

MÁRCIO VITO

**ESTUDO DAS PRORIEDADES MECÂNICAS DO EUCALIPTO
CITRIODORA EM CONDIÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação de Mestrado – DM
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais da Universidade do Extremo
Sul Catarinense - UNESC, como
requisito à obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof^o. Dr. Márcio Roberto
da Rocha

Co-Orientador: Prof^o. Dr. Fernando
Pelisser

**CRICIÚMA
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

V845 Vito, Márcio.

Estudo das Propriedades Mecânicas do Eucalipto
Citriodora em Condição de Incêndio /Márcio Vito;
orientador: Márcio Roberto da Rocha, co-orientador:
Fernando Pelisser. – Criciúma, SC : Ed. do Autor, 2013.
112 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul
Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais, Criciúma (SC), 2013.

1. Propriedades mecânicas da madeira em situação de
incêndio. 2. Madeira tratada com preservativo do tipo CCA.
3. *Eucalyptus citriodora*. 4. Toxicidade dos preservativos do
tipo CCA. I. Título.

CDD. 22ª ed. 620.12

MÁRCIO VITO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO
EUCALYPTUS CITRIODORA EM CONDIÇÃO DE INCÊNDIO

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 22 de fevereiro de 2013.

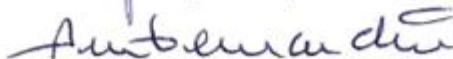


Prof. Dr. Elídio Angioletto
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Eduardo Roberto Batiston

Universidade Comunitária da Região de Chapecó - UNOCHAPECÓ



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me conduzido e me ajudado a superar mais esse desafio.

À minha esposa Fabíola e meu filho Bruno, pelo amor, carinho, incentivo, compreensão e paciência durante essa trajetória.

Gostaria de agradecer em especial ao meu orientador professor Dr. Márcio Roberto da Rocha, pelos ensinamentos e pela amizade constituída. Aos demais professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), pelo conhecimento e amizade.

Ao Prof. Dr. Elidio Angioletto pela valiosa ajuda e indispensável auxílio na execução experimental.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite.

À UNESC pelo incentivo intelectual e financeiro.

A Siderúrgica Spillere Ltda. pela atenção e fornecimento de materiais para execução dos ensaios.

RESUMO

A redução da seção transversal de elementos estruturais de madeira expostas à temperatura elevada é fator determinante para redução na capacidade de suporte às cargas aplicadas e consequentemente provocar seu colapso. Neste trabalho foram utilizadas vigas de madeira do tipo *Eucalyptus citriodora* tratadas pelo processo de impregnação por pressão elevada com preservativo do tipo CCA. As amostras ensaiadas foram compostas de três corpos de prova, com dimensões em tamanho real, distribuídos em cinco grupos, sendo cada grupo com temperaturas de 32°C, 200°C, 350°C, 650°C e 700°C. Em laboratório determinou-se a concentração de metais pesados componentes dos preservativos da madeira quando volatilizados através da exposição em incêndio em situações de falta e de excesso de oxigênio através do ensaio de absorção atômica. Na sequência realizou-se a exposição a condições de incêndio das amostras, pertencentes a cada grupo, em forno com dimensões internas de 150x200 cm e 150 cm de altura, aquecidos por queimadores a gás natural por um tempo igual a 60 minutos e rompimento das amostras através do ensaio de resistência à flexão estática. Com os resultados obtidos foi analisada a redução proporcional da seção para cada temperatura exposta e a carga máxima suportada. Os resultados mostram a redução gradativa da seção transversal e consequentemente da capacidade de resistência das amostras. Ficou evidente que a capacidade de suporte de carga das vigas de madeira está ligada diretamente a seção transversal, sendo menor a redução de seção para peças maiores. Nesta pesquisa foi proposto um modelo de majoração das cargas características suportadas pelas amostras em função da temperatura exposta.

Palavras-chave: Madeira, resistência, temperatura, preservativos, incêndio.

ABSTRACT

The reduction of the cross section of wooden structural elements exposed to high temperature is a determining factor for reduced ability to support applied loads and consequently cause its collapse. In this study, we used wooden beams type *Eucalyptus citriodora* treated by the process of impregnation with preservative by high pressure type CCA. The test samples consisted of three test pieces with dimensions in actual size distributed into five groups, each group with temperatures of 32 ° C, 200 ° C, 350 ° C, 650 ° C and 700 ° C. In laboratory determined the concentration of heavy metals components of wood preservatives when volatilized through exposure in fire situations and lack of excess oxygen by atomic absorption assay. Following held exposure to fire conditions the samples belonging to each group in oven with internal dimensions of 150x200 cm and 150 cm, heated by natural gas burners for a time equal 60 minutes and disruption of the samples through the test for resistance to bending. With the results we analyzed the proportional reduction of the exposed section for each temperature and maximum load. The results show a gradual reduction in cross section and hence the resilience of samples. It was evident that the load bearing capacity of the wooden beams is directly linked to the cross section, but the small reduction section for larger pieces. In this study we have proposed a model of the surcharge loads features supported by the samples exposed a function of temperature.

Keywords: Wood, resistance, temperature, condoms, fire.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 01 – Área carbonizada | 29 |
| Figura 02 - Vigas de madeira e aço após um incêndio | 30 |
| Figura 03 – Superfície florestal mundial | 31 |
| Figura 04 – Área de florestas plantadas e nativas preservadas pelas associadas individuais da ABRAF por estado em 2009 | 32 |
| Figura 05 – Imagens do <i>Eucalyptus Citriodora</i> | 35 |
| Figura 06 – Estrutura celular de resinosas..... | 36 |
| Figura 07 – Estrutura celular de folhosas | 37 |
| Figura 08 – Secção transversal ampliada 20x: Resinosa – Folhosa | 37 |
| Figura 09 – Ligações de hidrogênio nas cadeias de celulose e atrações eletrostáticas. | 40 |
| Figura 10 – Módulo de elasticidade relativo à flexão. | 47 |
| Figura 11 – Módulo de elasticidade relativa à compressão. | 48 |
| Figura 12 – Profundidade de carbonização x fluxo de calor (folhosas). | 49 |
| Figura 13 – Profundidade de carbonização | 51 |
| Figura 14- Curvas de incêndio real. | 64 |
| Figura 15- Curva de incêndio padrão. | 65 |
| Figura 16 - Fluxograma dos experimentos desenvolvidos para avaliar os materiais testados. | 67 |
| Figura 17 – Diagrama esquemático do ensaio para determinar a profundidade de carbonização da madeira. | 71 |
| | 71 |
| Figura 18 - (a) Posicionamento do maçarico (lado frontal), (b) lado contrário à aplicação da chama do maçarico, (c) Termopares a 5 cm, 10 cm e 15 cm da face frontal, (d) Chama do maçarico, (e) Superfície carbonizada, (f) Redução da seção carbonizada. | 71 |
| Figura 19 – Câmara de vedação para acúmulo de gás de combustão. | 72 |
| Figura 20 – (a) Alto teor de O ₂ e (b) Baixo teor de O ₂ | 73 |
| Figura 21 – (a) Forno construído em tijolo refratário e (b) Disposição das vigas no forno. | 74 |
| Figura 22 – Posição dos queimadores em faces opostas. | 74 |
| Figura 23 – (a) Termopares no meio do vão das vigas de madeira e (b) Termopares a 6 cm e 10 cm da face superior da viga de madeira. | 75 |
| Figura 24 – Corpo de prova para ensaio à flexão. | 75 |
| Figura 25 – Corpo de prova de flexão estática. | 76 |
| Figura 26 – Células de carga. | 76 |
| Figura 27 – Pórtico de reação. | 77 |
| Figura 28 - Profundidade da carbonização na madeira. | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – (a)Gráfico temperatura x tempo para ensaio à 200°C; (b) 350°C; (c) 650°C; (d) 700°C..... | 81 |
| Figura - 30 – a) Gráfico resumo da temperatura x tempo para todas as temperaturas e b) Resultados comparativos entre os termopares localizados a 2 cm e 6 cm da superfície da amostra cada temperatura testada..... | 82 |
| Figura 31 – Vigas de madeira após 60 minutos à temperatura de 200°C. | 83 |
| Figura 32 – Seção transversal da viga de madeira a 350°C (corte no meio do vão). (Área determinada pelo software Autocad da Autodesk). | 84 |
| Figura 33 – Amostras após o ensaio à temperatura de 350°C, (a) Vigas de madeira, (b) Vigas de aço e (c) Vigas de madeira com rachaduras aparentes..... | 84 |
| Figura 34 – Seção transversal da viga de madeira à 650°C (corte no meio do vão). (Área determinada pelo software Autocad da Autodesk). | 86 |
| Figura 35 – Amostras após o ensaio à temperatura de 650°C, (a) Vigas de madeira e de aço e (b) Vigas de madeira com rachaduras aparentes..... | 86 |
| Figura 36 – Seção transversal da viga de madeira à 700°C (corte no meio do vão). (Área determinada pelo software Autocad da Autodesk). | 87 |
| Figura 37 – Amostras após o ensaio à temperatura de 700°C, (a) Vigas de madeira e de aço e (b) Vigas de madeira com rachaduras aparentes..... | 87 |
| Figura 38 – Área resultante das vigas de madeira. | 88 |
| Figura 39 – Área total reduzida das vigas de madeira. | 89 |
| Figura 40 – Rompimento das vigas de madeira de Eucalyptus citriodora à flexão estática, | 89 |
| Figura 41 – Rompimento das vigas de aço à flexão estática. | 90 |
| Figura 42 – Redução da capacidade de suporte de carga em função da temperatura..... | 92 |
| Figura 43 – Redução da capacidade de resistência das vigas em função da seção transversal. | 93 |
| Figura 44 – Redução da capacidade de suporte das amostras em função do aumento da temperatura. | 94 |
| Figura 45 – Carga de ruptura experimental e a carga de cálculo dimensionada de acordo com a NBR 7190:1997. | 95 |
| Figura 46 – Coeficiente de majoração de carga características em função da temperatura pré-determinada. | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Principais componentes da madeira. | 38 |
| Tabela 2 – Alteração da madeira com a temperatura. | 45 |
| Tabela 3 - Profundidade de carbonização projetada para espécies de madeira coníferas e folhosas. | 50 |
| Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço. | 60 |
| Tabela 6- Propriedades químicas..... | 61 |
| Tabela 7- Tempo mínimo de resistência ao fogo | 65 |
| Tabela 8 - Espécies de madeira utilizadas nos ensaios..... | 68 |
| Tabela 9 - Amostras de madeira e aço utilizadas nos ensaios. | 69 |
| Tabela 10 - Amostras de madeira utilizadas no ensaio de emissão de gases. | 73 |
| Tabela 11 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 200°C. 83 | |
| Tabela 12 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 350°C. 85 | |
| Tabela 13 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 650°C. 86 | |
| Tabela 14 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 700°C. 88 | |
| Tabela 15 - Carga máxima suportada pelas vigas em função da temperatura..... | 91 |
| Tabela 16 - Taxa de redução da capacidade de resistência das vigas em função da temperatura. | 92 |
| Tabela 17 - Cálculo da carga máxima suportada para uma viga com seção de 12x12cm e 190 cm de comprimento efetivo. | 94 |
| Tabela 18 - Relatório de ensaio de absorção atômica dos gases de combustão..... | 97 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABRAF | Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas |
| AMS | Associação Mineira de Silvicultura |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| DMA | Dimetilarsínico |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| LAI | Laboratório de Águas e efluentes Industriais da UNESCO |
| I-Parque | Instituto de Pesquisas Ambientais Tecnológicas da UNESCO |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo |
| MMA | Monometilarsônico |
| SNIF | Sistema Nacional de Informações Florestais |
| TRRF | Tempo Requerido de Resistência ao Fogo |
| TLV | Taxa Limite de Volatilização |
| UNESC | Universidade do Extremo Sul Catarinense |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 23 |
| 2 OBJETIVOS | 27 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 27 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 27 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 29 |
| 3.1 MADEIRA E AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL | 30 |
| 3.1.1 Madeira | 30 |
| 3.1.1.1 Florestas nativas e florestas plantadas | 31 |
| 3.1.1.2 <i>Eucalyptus citriodora</i> | 32 |
| 3.1.1.3 Classificação da madeira | 35 |
| 3.1.1.4 Estrutura da madeira..... | 35 |
| 3.1.1.5 Propriedades da madeira | 39 |
| 3.1.1.6 Propriedades térmicas da madeira | 42 |
| 3.1.1.7 Profundidade de carbonização da madeira | 48 |
| 3.1.1.8 Processos de tratamento da madeira | 52 |
| 3.1.1.9 Principais tipos de preservativos da madeira..... | 54 |
| 3.1.2 Aço | 59 |
| 3.1.2.1 Definições..... | 60 |
| 3.1.2.2 Materiais utilizados na proteção térmica das estruturas de aço | 61 |
| 3.2 MEDIDAS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO..... | 62 |
| 3.3 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO | 63 |
| 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 67 |
| 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS | 68 |
| 4.1.1 Madeira e aço..... | 68 |
| 4.1.1.1 Massa específica aparente | 69 |
| 4.1.1.2 Umidade | 69 |
| 4.1.1.3 Profundidade de carbonização..... | 70 |
| 4.1.1.4 Análise de concentração de metais pesados em fumos | 71 |
| 4.1.2 Preparação para ensaio das amostras em forno | 73 |
| 4.1.3 Ensaio de resistência à flexão estática | 75 |
| 4.1.3.1 Equipamentos utilizados para o ensaio de flexão em 4 pontos.. | 76 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 79 |
| 5.1 PROFUNDIDADE DE CARBONIZAÇÃO | 79 |
| 5.2 ENSAIOS DAS AMOSTRAS NO FORNO | 80 |
| 5.2.1 Amostras à temperatura de 200°C..... | 83 |
| 5.2.2 Amostras à temperatura de 350°C..... | 84 |
| 5.2.3 Amostras à temperatura de 650°C..... | 85 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.4 Amostras à temperatura de 700°C..... | 87 |
| 5.2.5 Área resultante da seção e área total reduzida da viga de madeira..... | 88 |
| 5.3 ROMPIMENTOS DAS VIGAS | 89 |
| 5.4 ANÁLISES DE CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS EM FUMOS | 96 |
| 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 99 |
| 6.1 CONCLUSÕES..... | 99 |
| 6.2 SUGESTÕES | 100 |
| REFERÊNCIAS | 101 |
| ANEXOS | 109 |
| ANEXO A – Termo de garantia da madeira tratada com preservativo tipo CCA. | 110 |
| ANEXO B- Gráficos com as curvas de ensaio de rompimentos para as vigas de madeira, (a) Vigas 6A, 6B e 6C, (b) Vigas 1A, 2A e 3A, (c) Vigas 1C, 2C e 3C, (d) Vigas 4A, 4B e 4C, (e) Vigas 5A, 5B e 5C. | 111 |

1 INTRODUÇÃO

A construção civil utiliza diversos materiais para a concepção de seus produtos, tanto em estruturas simplificadas como complexas, de alto ou de baixo carregamento. Materiais tradicionais como concretos e ferragens metálicas são normalmente utilizados para fins estruturais, além da utilização da madeira. Tal como o aço, que apresenta uma grande variedade de ligas com diferentes resistências mecânicas, a madeira apresenta diversas variedades e, principalmente, nuances quanto às questões de anisotropia.

Estes materiais, quando considerados no cálculo estrutural normalmente não têm suas propriedades avaliadas quanto à variação de temperatura, principalmente em situação de incêndio. Destaca-se que a grande maioria dos projetos estruturais é elaborada de forma alheia às condições de incêndio, o que pode levar a rápida redução da resistência mecânica e a falha do projeto.

Diversos trabalhos são encontrados no que se refere às variações de propriedades mecânicas dos materiais metálicos, nos quais se verifica rápida redução de sua resistência mecânica com o aumento de temperatura (SINHA, 2010; CHIAVERINI, 1991). Aliado a isto, diversas normas técnicas nacionais e internacionais estão disponíveis e versam sobre os cuidados que devem ser tomados no projeto decorrente das necessidades estruturais, bem como quanto aos riscos de incêndio. Podem-se citar as normas brasileiras NBR 8800:2008, NBR 14762:2003 e, EC 2 e 3. Com relação à madeira verificam-se resultados contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura. Essa divergência nos resultados pode estar relacionada à variedade de métodos adotados para realização de pesquisas.

Alguns pesquisadores não observaram qualquer alteração nas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (COMBEN, 1955; LADELL, 1956; PETRY & ANAYIN, 1966 citado por SALAMON, 1969; MILLETT & GERHARDS, 1972).

Outros obtiveram aumento em algumas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (KEYLWERTH, 1960; LADELL, 1956; SULZBERGER, 1953; SCHNEIDER, 1973), e outros pesquisadores ainda observaram redução em algumas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (MACLEAN, 1953, 1954, 1956; COMBEN, 1955; KOSLIK, 1976; MILLETT & GERHARDS, 1972; ROSEN & BODKIN, 1981; BODIG & JAYNE, 1993).

Porém, no que confere a utilização da madeira as informações disponíveis para a concepção de projeto balizam-se sobre a questão principalmente estrutural em situação normal de acordo com a NBR 7190:97 vigente até o presente momento, e poucas informações são encontradas sobre os efeitos da temperatura sobre suas propriedades mecânicas e físicas em situação de escala real e tratada com preservativo do tipo CCA (Arsenato de Cobre Cromatado). Além disto, dificuldades surgem em virtude das grandes variações de propriedades entre as diferentes espécies, e de sua estrutura anisotrópica, o que dificulta o desenvolvimento de padrões, principalmente em condições mais severas de utilização.

Apesar disto, destaca-se a utilização da madeira devido as suas excelentes propriedades mecânica, conforme apontado por Pfeil (2011), e pela sua facilidade de manipulação e fabricação. Aliado a este fator, destaca-se a facilidade de obtenção deste recurso, que tem caráter renovável.

Uma das espécies de madeiras mais utilizadas, para a fabricação de estruturas industriais, comerciais e residenciais no sul de Santa Catarina, é o *Eucalyptus* e dentre as espécies plantadas, o *Eucalyptus citriodora* apresenta maior aptidão para uso em estruturas, devido a suas propriedades físico-mecânicas, (Santos; Ballarin, 2002), o qual é provindo de plantações de reflorestamento.

De acordo com a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) o Brasil possui 544 milhões de hectares de superfície florestal, ficando em segundo lugar, somente atrás da Rússia que possui 851,4 milhões de hectares de superfície plantada.

Segundo o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF) O Brasil detém hoje as melhores tecnologias na silvicultura do *Eucalyptus*, atingindo cerca de 60m³/ha de produtividade, em rotações de sete anos.

Atualmente, o Brasil possui cerca de 6,6 milhões de hectares de florestas plantadas, principalmente com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, que representam cerca de 0,8% do território nacional. As florestas plantadas são responsáveis por abastecer quase a metade do mercado brasileiro de madeira (ABRAF, 2010).

Com relação ao estado de Santa Catarina, segundo a ABRAF (2010) as florestas plantadas com *Eucalyptus* chegaram a 100.140,00 ha, ocupando a décima colocação no país.

Material este abundante, renovável e com propriedades mecânicas e físicas ideais para aplicação como elemento estrutural quando é calculado para desenvolver essa função, leva em conta somente as características inerentes à utilização em situações normais, ou seja, sem

alteração de suas propriedades físico-mecânicas resultantes de uma situação de incêndio.

A legislação brasileira impõe que a madeira para uso estrutural passe por tratamentos com preservativos e o processo mais utilizado no Brasil é o tratamento a base de Arsianato de Cobre Cromato (CCA).

No entanto nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) declarou, em 2003, que as indústrias decidiram voluntariamente não mais empregar madeira tratada com CCA para objetos de uso residencial, devido ao alto risco de contato para seres humanos, não havendo restrições quanto ao emprego do produto para fins rurais e industriais. Em outros países, como o Brasil, ainda não despertaram atenção necessária e são tratados da mesma forma que os demais resíduos sólidos conforme a norma (FERRARINI et al,2012).

Isto inclusive pode ser comprovado através de Leis e decretos, tornando obrigatório, o emprego de madeiras preservadas no Brasil (Lei N 4.797 de 20/10/65 e Decretos-Lei n. 58016 de 18/03/1966, N 61248 de 30/08/1967).

Conforme destacado acima, *Eucalyptus citriodora* tratada com preservativo do tipo CCA é um tipo de madeira amplamente utilizada, mas há uma lacuna quanto às questões de segurança, principalmente quanto as variações de suas propriedades e toxidez frente a temperaturas elevadas e/ou incêndios.

Assim, a proposta do presente projeto é o estudo do comportamento do *Eucalyptus* tratado com preservativo tipo CCA, em condições de temperaturas elevadas, normalmente encontradas em incêndios. As respostas obtidas serão comparadas com o comportamento de estruturas metálicas, sob as mesmas condições e poderão prover um melhor entendimento do eucalipto para aplicações estruturais.

Dessa forma, o trabalho está estruturado basicamente em seis capítulos, que são distribuídos da seguinte forma:

- O capítulo I apresenta a parte introdutória, apresentando o tema, o problema e a justificativa do trabalho;
- No capítulo II são apresentados os objetivos do trabalho;
- O capítulo III aborda as características próprias da madeira e do aço, florestas plantadas, processo de tratamento da madeira, como também medidas de segurança contra incêndio.;
- No capítulo IV é demonstrado todo o procedimento experimental para a realização do trabalho;
- O capítulo V expõe os resultados e discussões gerados;

- No capítulo VI revelam-se as conclusões e discussões.
Para finalizar constam as referências e anexos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o de estudar as propriedades mecânicas de estruturas de madeira do tipo *Eucalyptus citriodora* tratada com preservativo do tipo CCA, quando submetidas à condição de incêndio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento mecânico da madeira de *Eucalyptus citriodora* em temperaturas de até 700°C;
- Avaliar o processo de combustão da madeira e seu efeito sobre as propriedades estruturais da mesma;
- Comparar o comportamento das amostras em relação à resistência à flexão estática previsto nos cálculos teóricos com aqueles observados experimentalmente para cada temperatura estudada;
- Fornecer subsídios para a norma ABNT NBR 7190 – Projetos de Estruturas de Madeira (1997), com relação à combustibilidade e tempo de resistência de peças estruturais de *Eucalyptus citriodora* tratada com preservativo tipo CCA;
- Verificar a concentração dos metais pesados nos fumos resultantes do incêndio de estruturas de *Eucalyptus citriodora* tratada com preservativo do tipo CCA.
- Investigar o comportamento dos componentes utilizados nos preservativos do tipo CCA em condições de incêndio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Elevadas temperaturas são um grande problema dos materiais aplicados como elementos estruturais na construção civil. O aço tem resistência e módulo de elasticidade reduzida, a madeira tem sua seção reduzida gradualmente e o concreto, além da redução da resistência, perde área resistente devido ao “*spalling*”. Segundo (Silva, Valdir Pignatta et al , 2008), “*spalling*” é um lascamento da superfície do elemento de concreto submetido a um incêndio, devido à pressão interna da água ao evaporar-se e ao comportamento diferencial dos materiais componentes do concreto. A temperatura média atingida por um elemento isolado de aço em incêndio é geralmente maior do que a dos outros dois materiais, Já os elementos de madeira sofrem carbonização na superfície exposta ao fogo recebendo proteção na região central, que permanece com baixas temperaturas (Figura 01 e 02).

A combustibilidade da madeira é interpretada desfavoravelmente por projetistas do setor construtivo e se faz declinar a outras opções na escolha do material estrutural. No entanto é necessário ponderar a respeito das características que lhe são favoráveis e as que não lhe são favoráveis, visto que o principal obstáculo para o maior aproveitamento da madeira estrutural é o desconhecimento total ou parcial das potencialidades próprias do material, de notória variabilidade, sob as diversas condições de uso (Silva, Valdir Pignatta et al , 2008)

Figura 01 – Área carbonizada



Fonte: FIGUEROA, M. J; MORAES, P. D. (2009)

Figura 02 - Vigas de madeira e aço após um incêndio



Fonte: PFEIL (2011)

A seguir serão apresentadas características próprias da madeira e do aço, florestas plantadas, processo de tratamento da madeira, como também medidas de segurança contra incêndio.

3.1 MADEIRA E AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

3.1.1 Madeira

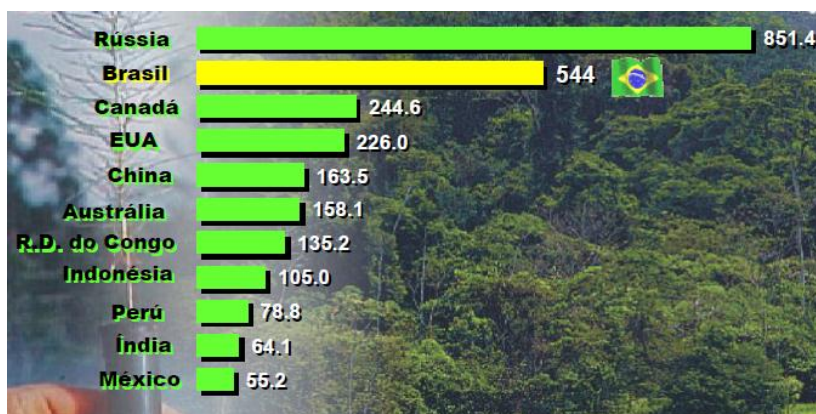
A madeira é depois do aço o material mais utilizado como material de construção. Em todas as etapas da construção a madeira se faz presente, desde a fundação até o acabamento (PFEIL, 2011).

Podem ser citadas algumas vantagens em relação ao uso da madeira. A madeira é um material renovável e abundante no país. Mesmo com um grande desmatamento o material pode ser reposto à natureza na forma de reflorestamento. É um material de fácil manuseio, definição de formas e dimensões. A obtenção do material na forma de tora e o seu desdobro é um processo relativamente simples, não requer tecnologia requintada, não exige processamento industrial, pois o

material já está pronto para uso. Demanda apenas acabamento. (PFEIL, 2011).

Segundo a FAO, as florestas cobrem 30% da área total da terra, sendo a área total de floresta em 2005 pouco menos de 4 bilhões de hectares, o que significa uma média de 0,62 per capita. O Brasil possui 544 milhões de hectares de superfície florestal, ficando em segundo lugar, somente atrás da Rússia que possui 851,4 milhões de hectares de superfície plantada (Figura 03).

Figura 03 – Superfície florestal mundial



Fonte: FAO (2005).

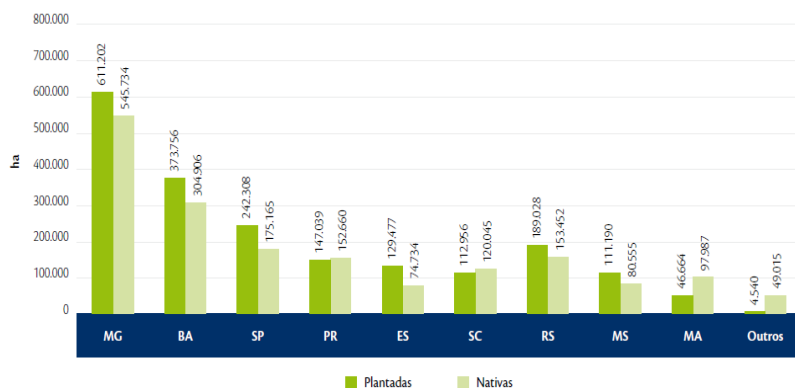
É importante que a madeira a ser utilizada na construção civil venha de florestas plantadas. Para isto de acordo com anuário da ABRAF (2010) no Brasil a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* totalizou 6.515.844 ha, sendo 74,8% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 25,2% aos plantios de *Pinus*.

3.1.1.1 Florestas nativas e florestas plantadas

É importante que as florestas plantadas não venham a provocar a degradação das florestas nativas. Segundo o Anuário da ABRAF (2010) para cada 1 ha de florestas plantadas as associadas contribuem com a preservação de 0,89 ha de florestas nativas. Este indicador tem evoluído ao longo do período, sendo que em 2005, a proporção era de 1 ha de florestas plantadas das associadas da ABRAF para 0,67 ha de área

preservada. As áreas com florestas nativas preservadas pelas associadas individuais da ABRAF foram 5,6% superiores em 2009 em relação ao ano anterior, passando de 1,65 milhão ha em 2008 para 1,75 milhão ha em 2009. Destaque se deve ao estado de Santa Catarina, que apresentou o maior aumento em áreas preservadas entre as associadas individuais da ABRAF, com cerca de 23%, totalizando 120 mil ha preservados em 2009 contra 97,6 mil ha em 2008 (Figura 04).

Figura 04 – Área de florestas plantadas e nativas preservadas pelas associadas individuais da ABRAF por estado em 2009



Fonte: ABRAF (2010).

3.1.1.2 *Eucalyptus citriodora*

A angiosperma do gênero *Eucalyptus* é originária da Austrália, pertence à família das Mirtáceas e possui 670 espécies identificadas. Seu nome, *Eucalyptus*, deriva do grego e se refere à estrutura globular arredondada de seu fruto: *eu*=bem, *kaliptus*=cobrir (Pinto, 2005).

De acordo com a Associação Mineira de Silvicultura (AMS), tamanha diversidade de espécies significa uma grande variedade de madeira e, portanto, possibilidades de utilização para as mais diversas finalidades.

É difícil precisar o ano da chegada do eucalipto ao Brasil. Informações mais remotas indicam a existência de dois exemplares de *E. Gigantea* no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, em 1825. Registros posteriores fazem referência a alguns exemplares no Rio Grande do Sul em 1865. A árvore era usada apenas como planta ornamental por causa

de suas propriedades sanitárias, principalmente pelo cheiro agradável das folhas.

No Brasil, o plantio do *Eucalyptus* sp foi consolidado graças ao seu excelente potencial para produção de madeira e por apresentar uma série de características favoráveis, entre elas: alta adaptabilidade a diferentes condições de clima e solo; elevada produção de sementes e facilidade de propagação vegetativa; crescimento rápido, alta produtividade e boa forma de fuste; boa resposta a tratamentos culturais de manejo e melhoramento genético; adequações aos mais diferentes usos e aceitação de mercado (MORA; GARCIA, 2000; SILVA, 2005).

Este tipo de madeira foi selecionado para realização deste trabalho, tomando como base a potencialidade de utilização na construção civil, bem como, a enorme quantidade de áreas de plantio no Estado de Santa Catarina.

A caracterização da madeira do tipo *Eucalyptus Citriodora* desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT, 2003) é apresentada da seguinte forma:

- Características sensoriais: cerne e albúrneo distintos pela cor, cerne pardo, albúrneo branco-amarelado; sem brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã variável: direita, ondulada e revessa; textura fina a média (Figura 05).
- Descrição anatômica macroscópica:
 - Parênquima axial: visível apenas sob lente, paratraqueal vasicêntrico e aliforme de aletas curtas.
 - Raios: visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial; finos; de poucos a numerosos.
 - Vasos: visíveis a olho nu, pequenos a médios; poucos; porosidade difusa; arranjo radial e diagonal; solitários e múltiplos; obstruídos por tilos.
 - Camadas de crescimento: pouco distintas, quando presente individualizado por zonas fibrosas tangenciais mais escuras.
 - Canais axiais traumáticos: presentes em alguns espécimes.
- Durabilidade e tratamento:
 - Durabilidade natural: Madeira suscetível à ação de cupins e xilófagos marinhos.

- Resistente ao apodrecimento.
- O cerne é difícil de ser tratado, entretanto, o alburno é permeável.
- Características de processamento:
 - Trabalhabilidade: Madeira excelente para serraria, no entanto, requer o uso de técnicas apropriadas de desdobro para minimizar os efeitos das tensões de crescimento. Apresenta boas características de aplainamento, lixamento, furação e acabamento. (IPT, 1997).
- Propriedades físicas:
 - Densidade Aparente a 15% de umidade é de 1040 kg/m³ e a básica : 867 kg/m³
- Contração:
 - Radial: 6,6 %
 - Tangencial: 9,5 %
 - Volumétrica: 19,4 %
- Propriedades mecânicas:
 - Flexão:
 - Resistência (fm):
 - Madeira verde: 111,8 MPa
 - Madeira a 15% de umidade: 121,4 MPa
 - Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 47,2 MPa
 - Módulo de elasticidade - Madeira verde: 13337 MPa
 - Compressão paralela às fibras:
 - Resistência (fc0):
 - Madeira verde: 51,1 MPa
 - Madeira a 15% de umidade: 62,8 MPa
 - Coeficiente de influência de umidade: 4,7 %
 - Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 33,7 MPa
 - Módulo de elasticidade - Madeira verde: 15867 MPa

Resultados estes obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85) (IPT, 1989b).

Figura 05 – Imagens do *Eucalyptus Citriodora*.



Fonte: IPT (2003).

3.1.1.3 Classificação da madeira

Segundo PFEIL (2011), as madeiras utilizadas em construção são obtidas de troncos de árvores. Distinguem-se duas categorias principais de madeiras:

Madeiras duras: Provenientes de árvores frondosas (Dicotiledônea, da classe Angiosperma, com folhas achatadas e largas), de crescimento lento, como peroba, ipê, aroeira, carvalho, etc. Madeiras duras de melhor qualidade são também chamadas de madeira de lei.

Madeiras macias: Provenientes em geral das árvores Coníferas (da classe Gimnosperma, com folhas em forma de agulhas ou escamas, e sementes agrupadas em forma de cones), de crescimento rápido, como pinheiro-do-paraná e pinheiro-bravo, ou pinheirinho, pinheiros europeus, norte-americanos, etc.

Essas categorias distinguem-se pela estrutura celular dos troncos e não propriamente pela resistência. Algumas árvores frondosas produzem madeira menos resistente que o pinho.

3.1.1.4 Estrutura da madeira

A madeira é um material heterogêneo e natural que possui diferentes tipos de células adaptadas a desempenharem funções específicas na árvore. Essas células são dispostas no sentido radial, tangencial e longitudinal, e ligadas entre si pela lignina, constituindo o tecido lenhoso. As variações físicas e anatômicas da madeira são grandes entre espécies e dentro da mesma espécie, principalmente em função da idade, de fatores genéticos e ambientais (BODIG; JAYNE, 1993).

3.1.1.4.1 Microestrutura da madeira

As células de madeira, denominada fibras, são como tubos de paredes finas alinhados na direção axial do tronco e colados entre si. As fibras longitudinais possuem diâmetro entre 10 e 80 micra e comprimento de 1 a 8 mm. A espessura das paredes das células varia de 2 a 7 micra. (PFEIL, 2011).

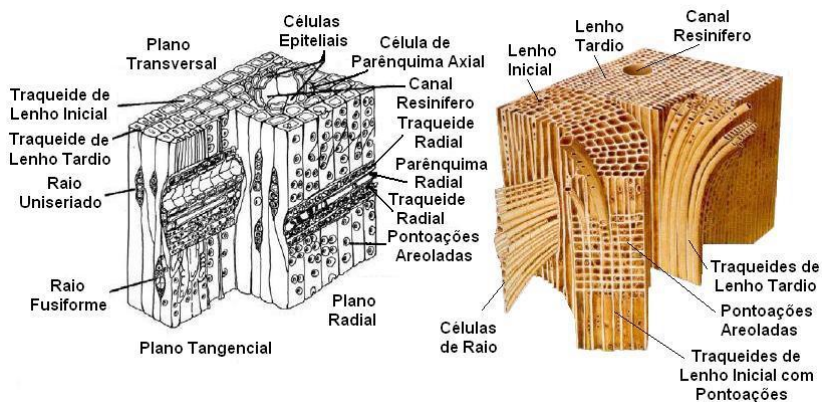
Continua PFEIL (2011), nas madeiras macias (coníferas) cerca de 90% do volume é composto de fibras longitudinais, que são o elemento portante da árvore. Além disso, elas têm a função de conduzir a seiva por tensão superficial e capilaridade através dos canais formados pelas cadeias das células.

Nas árvores de grande porte, as células longitudinais são fechadas nas extremidades; a seiva, então, circula em outras células de grande diâmetro, com extremidades abertas, justapostas, denominadas vasos ou canais. As fibras têm apenas a função de elemento portante.

A excelente relação resistência por peso da madeira confere uma eficiência estrutural das células fibrosas ocas.

A organização das células das resinosas (Coníferas) é simples. Está composta principalmente por células chamadas traqueídeos longitudinais, orientadas no sentido do eixo da árvore. Alguns dos seus principais elementos constituintes são: células na direção longitudinal e transversal, células epiteliais, canal resinífero, raio unisseriado. Esses elementos são apresentados na Figura 06.

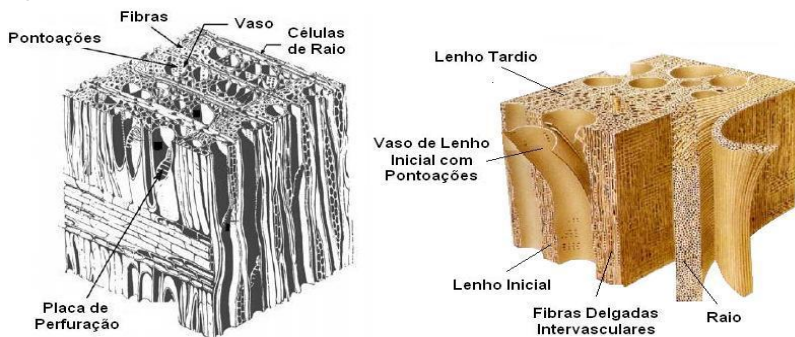
Figura 06 – Estrutura celular de resinosas



Fonte: (KOLMANN; COTÊ, 1968).

As folhosas (dicotiledônea) possuem uma estrutura mais complexa do que as das resinosas, devido, principalmente, a um maior número de tipos de células em sua estrutura anatômica. Entre os elementos constituintes encontram-se: elementos vasculares, fibras, células de raio, raio, fibras delgadas intravasculares, apresentados na Figura 07.

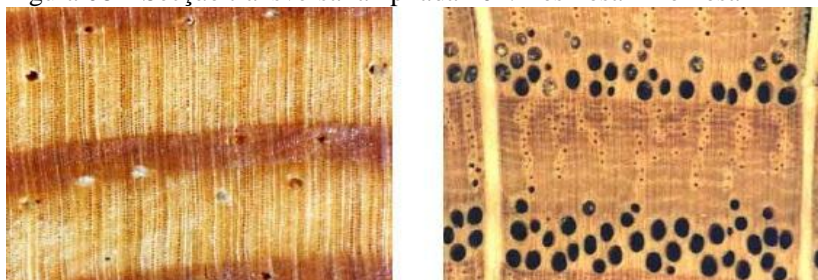
Figura 07 – Estrutura celular de folhosas



Fonte: (KOLMANN; COTÊ, 1968).

Na Figura 08 evidenciam-se as diferenças entre as resinosas e as folhosas no que respeita às suas estruturas celulares.

Figura 08 – Secção transversal ampliada 20x: Resinosa – Folhosa



Fonte: (Portal da madeira).

3.1.1.4.2 Estrutura molecular da madeira

A madeira é constituída principalmente por substâncias orgânicas. Os principais elementos constituintes apresentam-se nas seguintes

porcentagens aproximadas, independentemente da espécie vegetal considerada. Carbono com 50%, oxigênio com 44% e hidrogênio com 6%. (YOUNG et al ,1998)

O composto orgânico predominante é a celulose, que constitui cerca de 50% da madeira, formando os filamentos que reforçam as paredes das fibras longitudinais. Outros dois componentes importantes são as hemiceluloses (constituindo 20 a 25% da madeira) e a lignina (20 a 30%) que envolvem as macromoléculas de celulose ligando-as. A lignina provê rigidez e resistência à compressão às paredes das fibras (WANGAARD, 1979).

Na composição estrutural da madeira, ilustrada na Tabela 1, apresenta-se a seguinte composição percentual, em relação ao peso seco da madeira.

Tabela 1- Principais componentes da madeira.

| Componentes | Grupo | |
|----------------------|-------------|-----------|
| | Resinosas | Folhosas |
| Celulose | 45% a 50% | 45% a 50% |
| Hemicelulose | $\leq 20\%$ | 15% a 30% |
| Lignina | 23% a 35% | 16% a 25% |
| Outros constituintes | 5% a 10% | 5% a 10% |

Fonte: Fengel e Wegener (1989).

Do ponto de vista químico, a madeira é um material composto por vários polímeros orgânicos. A parede celular da madeira tem como estrutura básica a molécula linear de celulose, um polissacarídeo composto por monômeros de glucose. Estes polímeros de celulose compõem entre 45 % a 50% do peso seco da maioria das madeiras. Além da celulose, está presente na madeira a hemicelulose, formada por muitas combinações de pentoses de açúcar (xilose e arabinose) (FENGEL; WEGENER, 1989). A hemicelulose difere em alguns aspectos da celulose, principalmente em conformação, grau de polimerização e peso molecular, mas são de alguma forma, similares.

O terceiro maior constituinte da madeira é a lignina, molécula polifenólica tridimensional, pertencente ao grupo dos fenilpropanos, de estrutura complexa e alto peso molecular (FENGEL; WEGENER, 1989), o que confere à madeira a resistência característica a esforços mecânicos.

Muitas outras substâncias químicas estão ainda presentes nas madeiras, como os extrativos, resinas, taninos, óleos, gomas, compostos aromáticos e sais de ácidos orgânicos (FENGEL; WEGENER, 1989).

3.1.1.5 Propriedades da madeira

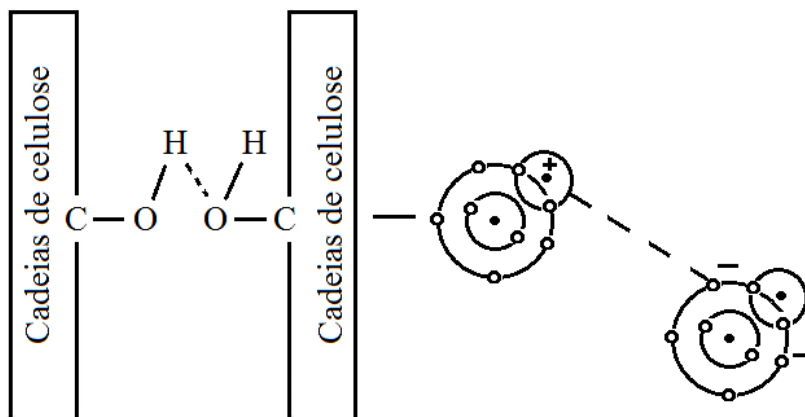
Como já se sabe, a madeira é um material heterogêneo, possuindo diferentes tipos de células, adaptadas ao desempenho de funções específicas e a variações nas suas composições químicas, físicas e anatômicas são grandes entre espécies. Dentro da mesma espécie, elas também ocorrem conforme a idade, posição na árvore, fatores genéticos e ambientais. O ambiente, bem como sua manipulação, pode afetar as características da madeira e, conseqüentemente, sua qualidade. As propriedades físico-mecânicas da madeira de árvores plantadas em um ambiente exótico podem ser significativamente diferentes, muitas vezes, daquelas cultivadas em um ambiente nativo (MANRIQUEZ, 2012).

Latorraca et al. (2000) observaram que as propriedades da madeira variam conforme o crescimento da árvore, com a ressalva de que a porção da madeira correspondente aos primeiros anéis formados apresenta menor massa específica e fibras mais curtas, entre outras características, ou seja, a diferença entre lenho juvenil e adulto. Verificaram que há aumento da massa específica, bem como da espessura da parede celular em anéis sucessivos, a partir do centro para a periferia do tronco da árvore, no sentido medula casca. Também foi verificado que a densidade tende a aumentar com a idade, com conseqüente aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células.

A umidade, massa específica, tipos de água presente na madeira, contração e inchamento, são os principais fatores que afetam principalmente as propriedades físicas da madeira (MANRIQUEZ, 2012).

O comportamento das regiões amorfas da celulose tem um efeito significativo sobre a resistência mecânica. Em geral, acredita-se que as moléculas de celulose são mantidas sob controle combinado por meio da ligação de ponte de hidrogênio das regiões amorfas e cristalinas. Na região cristalina, a ligação do hidrogênio é completamente regular. Na região amorfa, a ligação é altamente irregular e muito mais variável. As ligações de hidrogênio entre as cadeias de celulose são os resultados do intercâmbio de elétrons entre o grupo de hidroxila de uma cadeia e o oxigênio de outra, conforme ilustrado na Figura 09 (MANRIQUEZ, 2012).

Figura 09 – Ligações de hidrogênio nas cadeias de celulose e atrações eletrostáticas.



Fonte: (BODIG; JAYNE, 1993).

As regiões cristalinas são resultantes da ação combinada da bi polimerização e cristalização da celulose, causadas por processos enzimáticos. As regiões amorfas resultam da má formação da estrutura devido à alteração no processo de cristalização. As regiões amorfas são citadas, por alguns autores, como regiões em que a cristalização ocorreu com defeito. A proporção entre as regiões cristalinas e amorfas, que determina o grau de cristalinidade e as características dimensionais dos domínios cristalinos, é variável (MANRIQUEZ, 2012).

A variação da resistência à tração e do módulo de elasticidade da madeira estão relacionados diretamente com a variação do grau de cristalinidade dela mesma, ou seja, quando as fibras apresentam maiores regiões cristalinas, a resistência mecânica aumenta, pois a celulose é o único componente presente na fibra que se cristaliza (MANRIQUEZ, 2012).

A celulose é o polímero que mais contribui para a resistência mecânica da madeira. As cadeias de celulose são extremamente resistentes a esforços de tração e de compressão, devido às pontes de hidrogênio dentro dela. Estas ligações, entre grupos OH de unidades glicosídicas adjacentes da mesma molécula de celulose, são ligações intramoleculares, responsáveis por certa rigidez das cadeias unitárias, ou seja, quanto maior o grau de polimerização da celulose, maior é a

resistência à tração das fibras. A composição química de fibras lignocelulósicas influencia as suas propriedades mecânicas e a sua estrutura física, sendo que o conteúdo de lignina e de hemicelulose presentes nas fibras tem efeito sobre a resistência à tração (MANRIQUEZ, 2012). A resistência e a rigidez das fibras dependem do conteúdo de celulose e do ângulo espiral que as microfibrilas da parede celular secundária fazem com o eixo da fibra.

Acredita-se que a lignina contribui positivamente para todas as propriedades físico-mecânicas da madeira, em particular para a resistência à compressão e ao cisalhamento na parede celular por dominar a instabilidade lateral das microfibrilas e a resistência ao corte (MANRIQUEZ, 2012).

Junto com os componentes da parede celular, existem numerosas substâncias que são chamadas extrativos. Os extrativos presentes na madeira são compostos orgânicos com características comuns, principalmente aqueles que podem ser extraídos com água ou com outros solventes orgânicos. Entre os extrativos, encontram-se terpenos, fenóis, taninos, ácidos graxos, flobafenos, ceras e resinas. Os extrativos apresentam um efeito favorável sobre a resistência à compressão paralela às fibras e um menor efeito sobre o módulo de ruptura e pouca influência sobre a resistência ao choque. Em geral, pode-se concluir que o efeito dos extrativos sobre as propriedades mecânicas é inferior ao seu efeito sobre a massa específica. É fato conhecido que os extrativos apresentam uma influência significativa sobre a durabilidade natural da madeira (MANRIQUEZ, 2012).

Segundo a NBR 7190:1997, as propriedades da madeira são condicionadas por sua estrutura anatômica, devendo distinguir-se os valores correspondentes à tração dos correspondentes à compressão, bem como os valores correspondentes à direção paralela às fibras dos correspondentes à direção normal às fibras. Devem também distinguir-se os valores correspondentes às diferentes classes de umidade. A caracterização mecânica das madeiras para projeto de estruturas deve seguir os métodos de ensaio especificados no anexo B, a serem referidos à condição padrão de umidade ($U=12\%$):

a) resistência à compressão paralela às fibras (f_{wc0}) a ser determinada em ensaios de compressão uniforme, com duração total entre 3 min e 8 min, de corpos-de-prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 15 cm;

b) resistência à tração paralela às fibras (fwt0) a ser determinada em ensaios de tração uniforme, com duração total de 3 min a 8 min, de corpos-de-prova alongados, com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $(8 \cdot A)$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que garantam a ruptura no trecho central;

c) resistência à compressão normal às fibras (fwc90) a ser determinada em um ensaio de compressão uniforme, com duração total de 3 min a 8 min, de corpos-de-prova de seção quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 10 cm;

d) resistência à tração normal às fibras (fwt90) a ser determinada por meio de ensaios padronizado, para efeito de projeto estrutural, considera-se como nula a resistência à tração normal às fibras das peças de madeira;

e) resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (fwv0) a ser determinada pelo ensaio de cisalhamento paralelo às fibras;

f) resistência de embutimento paralelo às fibras (fwe0) e resistência de embutimento normal às fibras (fwe90) a serem determinadas por meio de ensaios padronizados;

g) densidade básica, determinada de acordo com Item 6.1.2 da NBR 7190:97, e a densidade aparente, com os corpos-de-prova a 12% de umidade.

A NBR 7190:1997 determina ainda, através do seu anexo B, os seguintes ensaios: Umidade e estabilidade dimensional.

3.1.1.6 Propriedades térmicas da madeira

Com relação a madeira verifica-se resultados contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura. Essa divergência, segundo Pinto (2002), pode estar relacionada à variedade de métodos adotados para realização de pesquisas o qual aponta os trabalhos de (COMBEN, 1955; LADELL, 1956; PETRY & ANAYIN, 1966 citado por SALAMON, 1969; MILLETT & GERHARDS, 1972), que não observaram qualquer alteração nas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura.

Outros obtiveram aumento em algumas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (KEYLWERTH, 1960; LADELL, 1956; SULZBERGER, 1953; SCHNEIDER, 1973). Outros pesquisadores ainda observaram redução em algumas propriedades mecânicas da madeira com a temperatura (MACLEAN, 1953, 1954, 1956; COMBEN, 1955; KOSLIK, 1976; MILLETT & GERHARDS, 1972; ROSEN & BODKIN, 1981; BODIG & JAYNE, 1993). Segundo PINTO (2002), as propriedades térmicas da madeira têm um comportamento não linear, variando em função da temperatura. O anexo B da Eurocode 5, 2004 representa os valores das propriedades térmicas a utilizar em projeto na situação de exposição a um fogo normalizado. Valores de temperatura inferiores a 300°C traduzem as propriedades da madeira normal e valores acima de 300°C representam as propriedades da camada carbonizada.

A combustão superficial forma uma capa de madeira calcinada que impede a passagem do ar dificultando a queima. Esta capa tem aproximadamente 10 mm de espessura, e se a temperatura permanecer constante a queima cessa. Peças com menos de 25 mm não devem ser usadas porque não formam a capa de proteção, destruindo-se rapidamente (PINTO, 2005).

A relação entre a profundidade de carbonização e a resistência ao fogo é observada por normas de dimensionamento de estruturas de madeira, tal como o Eurocode 5: *Design of timber structures*, Part 1-2 (2004) que considera a atuação do fogo prevendo que a estabilidade das estruturas deve ser verificada pela combinação das ações nela aplicadas, levando em conta a redução da seção transversal e consequente perda da área resistente. A estrutura entrará em colapso quando o esforço atuante superar o esforço resistente (PINTO, 2005).

O conhecimento de que a madeira apresenta boa resistência quando submetida a condições de incêndio é antigo. Mas, apesar de ser um conhecimento comum a todos, não havia provas científicas que atentassem a isto. Por volta do século XX, mais precisamente a partir da década de 1950, os diferentes materiais (tais como o aço, concreto, madeira, entre outros) passaram a ser alvo de investigação na busca do melhor desempenho quando em exposição ao fogo, com base em princípios científicos. Isto resultou em vantagens à madeira, pois assim pôde se comprovar, graças as suas propriedades físicas e mecânicas, que ela apresenta um comportamento diferente dos demais materiais utilizados em construção, comportamento este que lhe é favorável (SILVA, Pignatta et al, 2008).

A madeira é um material combustível, diferente do aço e do concreto. Tal como os demais combustíveis sólidos, a madeira, em condições normais, não se queima diretamente: ela primeiro se decompõe em gases que, expostos ao calor, se convertem em chamas que, por sua vez, aquecem a madeira ainda não atingida e promove a liberação de mais gases inflamáveis, alimentando a combustão tal qual um círculo vicioso. Fazendo uso destes conhecimentos, pode-se avaliar a segurança das estruturas afetadas por um incêndio e prever, com boa precisão em um projeto, o tempo de resistência dos elementos estruturais de uma edificação, possibilitando, por exemplo, que as vítimas de um incêndio sejam retiradas em segurança e que o fogo seja combatido sem que a estrutura comprometa a segurança de vida da brigada de incêndio ou danifique as edificações vizinhas (PINTO, 2005).

Em temperaturas elevadas, a madeira sofre um processo de degradação em que todos seus componentes são profundamente modificados. Ocorrem fenômenos físicos como perda de umidade, liberação de gases voláteis inflamáveis, combustão do material lenhoso e combustão incandescente do carbono fixo. A temperatura exata para a decomposição térmica da madeira dependerá significativamente da espécie vegetal e da sua composição química e do tipo de corte da madeira (MANRIQUEZ, 2012). A partir de 50 °C já ocorrem mudanças físicas e químicas dos constituintes principais da madeira. As reações exotérmicas iniciam-se entre 150 °C e 160 °C e aumentam com o aumento da temperatura, liberando maior quantidade de energia a temperaturas maiores que 200 °C, o que origina uma perda de massa acelerada (GORING, 1963; SCHAFFER, 1973, *apud* MANRIQUEZ, 2012).

Ao se expor a madeira a temperaturas de 100 °C, as ligações químicas em sua estrutura começam a se romper. Entre 100 °C e 200 °C há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos (SHAFIZADEH, 1985; LEVAN, 1989, *apud* MANRIQUEZ, 2012). Os polímeros da madeira volatilizam-se intensamente em distintas faixas de temperatura: as hemiceluloses entre 200 °C e 300 °C; a celulose entre 240 °C e 350 °C e a lignina entre 350 °C e 500 °C (RESENDE, 1995, *apud* MANRIQUEZ, 2012).

Manriquez (2012) elaborou a Tabela 2, após revisão bibliográfica, com as observações mais relevantes referentes à influência da temperatura sobre a madeira e seus polímeros.

Tabela 2 – Alteração da madeira com a temperatura.

| Tabela 2 - Alterações da madeira com a temperatura. | | | |
|---|--------------------------------------|---|---|
| Até 100 °C | Alterações | | Fonte e ano |
| | Saída de extrativos e mudança de cor | Saem os taninos hidrossolúveis da madeira e inicia-se a degradação deles. | Charrier et al. (1995) Burtin et al. (1998) |
| | | Ocorrência de mudanças químicas e físicas, atribuídas à emissão da água e extrativos tais como terpenos. | Manninen et al. (2002) Sundqvist (2004) |
| | | Inicia-se a mudança de cor da madeira. As madeiras resinosas tornam-se ligeiramente mais escuras que as folhosas. | Brauner e Loos (1968) McMillen (1976) Schmidt (1986) |
| | | Inicia-se a mudança de cor devido à hidrólise dos hidratos de carbono, ceras e aos extrativos. | Fengel (1966) Charrier et al. (1995) Burtin et al. (1998) |
| | Celulose | Degrada-se a celulose, influenciada negativamente pelo teor de umidade. | Roffael e Schaller (1971) |
| | Hemicelulose | Começo do amolecimento. | Schaffer (1973) |
| | Lignina | Altera-se a estrutura da lignina. | |
| | | | |
| 100-150 °C | Saída de água e mudança de cor | Evapora-se a água de impregnação. | Schaffer (1973) Kozlit (1968) |
| | | Iniciam-se mudanças significativas de cor. | Schneider (1971) e (1973) |
| | Celulose | A celulose decompõe-se termicamente devido às reações de despolimerização (hidrólise). | Gerhard (1979), (1982) e (1983) |
| | | | Koch (1985) |
| Hemicelulose | Há perda de massa. | Kollman e Fengel | |

| | | | |
|--------------|--------------|--|--|
| | | | (1965) |
| | Lignina | Ocorre mudança em sua estrutura, devido à saída de umidade. | Košíková et al. (1999) |
| | | | Westermarck et al. (1995) Kacík et al. (1999) |
| 150 – 200 °C | Extrativos | Saem gases combustíveis tais como terpenos e ceras em geral. | Manninen et al. (2002) |
| | Celulose | Aumenta a cristalinidade da celulose pura e muda do grau de polimerização da celulose isolada. | Roffael e Schaller (1971) Bhuiyan et al. (2000) |
| | | Ocorre a transição vítrea da celulose amorfa. | Yano et al. (1976) |
| | Hemicelulose | Aumenta a solubilidade em amostras aquecidas em água. Degradação significativa. | Mangalam A. (2005) |
| | | | Stamm (1956) |
| | | | Kollman e Fengel (1965) |
| | | | Fengel (1967) |
| | | | Tjeerdsma et al. 1998 |
| | | | Sivonen et al. 2002 |
| | Lignina | Transição vítrea de várias espécies. | Salmen, L (1982) |
| | | Endurece novamente. | Schaffer (1973) |
| 200 – 250 °C | Celulose | Transição vítrea para amostras seca. | Kargin. et al. (1960) Yano et al. (1976) Salmen, L. (1982) |
| | | Aumento da cristalinidade. | Sivonen et al. (2002) |
| | Hemicelulose | Transição vítrea em amostras secas e isoladas. | Salmen, L. (1982) |
| | | Degradação térmica. | Garrote et al. (1999) |
| | Lignina | Aumento forte da taxa de degradação da lignina. | Sivonen et al. (2002) Mangalam A. (2005) |
| 250 – 400 °C | Celulose | Despolimerização, desidratação e formação de radicais livres. Perda até um 83% de seu | Mangalam A. (2005) |

| | | | |
|--|--------------|----------------------|-----------------|
| | | peso. | |
| | Hemicelulose | Degradação completa. | Schaffer (1973) |

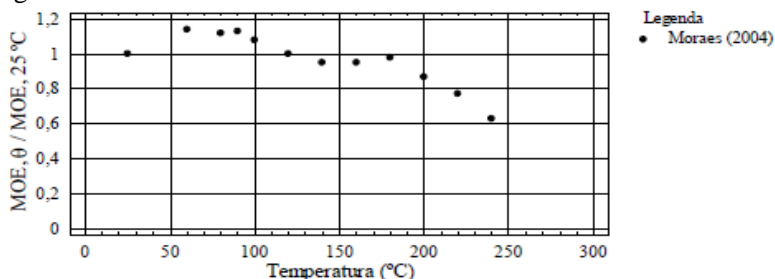
Fonte: (MANRIQUEZ, 2012).

A degradação da celulose, a hemicelulose e a lignina em temperatura reflete na perda de umidade e na perda de massa. A degradação térmica da celulose ocorre entre 200 °C e 280 °C, a hemicelulose entre 160 °C e 260 °C e a lignina ocorrem em torno de 150 °C e 300 °C. Próximo de 300 °C existe um rompimento das ligações de carbono e as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático. Quando a celulose e hemicelulose são submetidas até 600 °C, as perdas de massa são de 80% e 95%, respectivamente. Para temperaturas acima de 100 °C, as ligações químicas dos componentes da madeira começam a se romper. Entre 100 °C e 200 °C há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos. Acima de 200 °C aumentam as reações químicas exotérmicas. Na faixa de 280 °C até 300 °C, considerada como temperatura de ignição e de pirólise rápida, há eliminação de gases (MANRIQUEZ, 2012).

A exposição da madeira a altas temperaturas causa efeitos transitórios e permanentes. O aquecimento da madeira por curtos períodos de tempo causa a redução temporária da resistência mecânica que é recobrada quando a temperatura volta ao normal. Se a exposição a altas temperaturas é mantida por um período prolongado de tempo, os efeitos na madeira são permanentes (MANRIQUEZ, 2012).

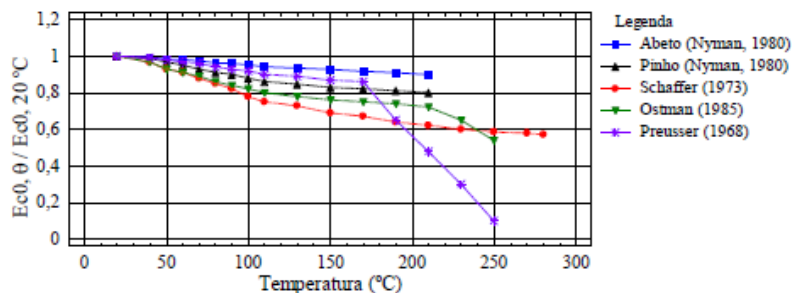
Manriquez (2012) apresenta resultados da influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade na flexão (Figura 10) e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (Figura 11).

Figura 10 – Módulo de elasticidade relativo à flexão.



Fonte: (MANRIQUEZ, 2012).

Figura 11 – Módulo de elasticidade relativa à compressão.



Fonte: (MANRIQUEZ, 2012).

Através das figuras pode-se perceber a redução do valor do módulo de elasticidade e a variedade de resultados obtidos para cada autor.

3.1.1.7 Profundidade de carbonização da madeira

Segundo Moraes et al (2009) o carvão é um subproduto da combustão parcial da madeira, apresentando resistência mecânica desprezível. A taxa com a qual a madeira é convertida em carvão é denominada profundidade de carbonização e serve para avaliar a resistência ao fogo de estruturas de madeira, visto que, de modo indireto, ela indica a redução da seção transversal dos elementos estruturais. Esse parâmetro, geralmente, é determinado por meio de testes de incêndio com elementos estruturais em tamanho real, nos quais a elevação da temperatura dos gases quentes segue as prescrições de curvas padrão de incêndio, tais como a das normas ISO 834 (1975) e ASTM E 119-08a (2009).

No Brasil há dois fornos capacitados para realização de ensaios com peças em tamanho real. Um está alocado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e outro em Furnas, Centrais Elétricas S. A. Goiás. Estes fornos são a gás e somente o forno do IPT realiza ensaios com aplicação simultânea de carregamento para os ensaios com paredes estruturais (PINTO, 2005).

A temperatura de carbonização da madeira, para a determinação da profundidade de carbonização para o cálculo estrutural em situação de incêndio, é um valor convencional para o qual não existe unanimidade até o momento. Na literatura, são encontrados valores entre 288 °C e 360 °C, sendo adotada pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2,

(2002) a temperatura de 300 °C como aquela de carbonização da madeira (SCHAFFER, 1967, *apud* MORAES et al,2009).

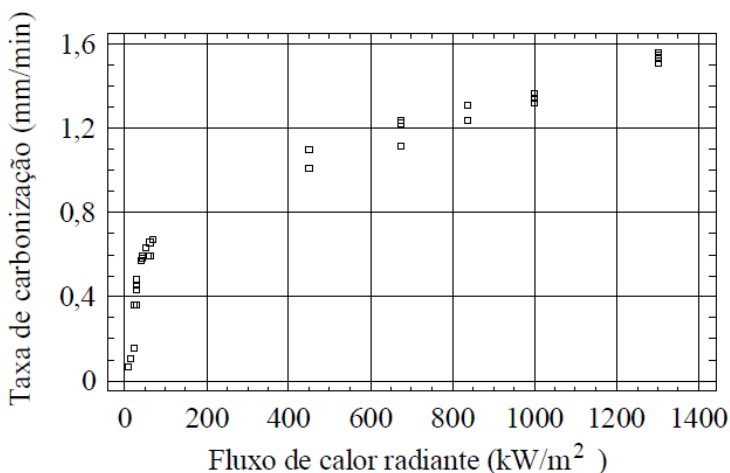
Existem vários fatores que influenciam a profundidade de carbonização. Podem ser citadas a massa específica, o teor de umidade, a espécie de madeira, as dimensões das peças de madeira, a forma da seção transversal e a intensidade do fluxo de calor. A massa específica afeta significativamente a profundidade de carbonização. Quanto maior a massa específica da madeira, menor é a profundidade de carbonização.

O teor de umidade da madeira é um fator importante na profundidade de carbonização, retardando o processo de combustão até a evaporação da água presente no material.

As dimensões e formas da seção transversal das peças de madeira influenciam a profundidade de carbonização. Para peças pequenas, a profundidade de carbonização é maior que para peças grandes, visto que peças pequenas apresentam maior superfície específica que peças grandes. (MORAES et al,2009).

A influência do fluxo de calor sobre a profundidade de carbonização é apresentada na Figura 12, onde é observado a não linearidade do fenômeno (MORAES et al,2009).

Figura 12 – Profundidade de carbonização x fluxo de calor (folhosas).



Fonte: Butler (1971) *apud* Drysdale (1998)

Visando compensar a perda de resistência, redução do módulo de elasticidade e o efeito do arredondamento dos cantos, (Figura 13),

algumas normas adotam taxas de carbonização com valores elevados, superiores a 1,0mm/min (Konig, 1999), enquanto os valores adotados pelo Eurocode 5 (2002) são 0,8mm/min. para coníferas e, 0,55mm/min. para folhosas, tabela 3 (PINTO, 2005).

Tabela 3 - Profundidade de carbonização projetada para espécies de madeira coníferas e folhosas.

| Especificação | Material | β_0 (mm/min.) | β_n (mm/min.) |
|---------------|---|---------------------|---------------------|
| coníferas | MLC, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0.65 | 0.7 |
| | Madeira serrada, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0.65 | 0.8 |
| folhosas | Madeira serrada ou MLC, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0.65 | 0.7 |
| | Madeira serrada ou MLC, densidade $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ | 0.5 | 0.55 |

β_0 taxa de carbonização básica para exposição em uma dimensão;

β_n taxa de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento das quinas e aparecimento de frestas;

MLC Madeira Laminada Colada.

Fonte: (Eurocode 5, 2002).

A EC5 (2002) faz uma distinção entre a profundidade de carbonização unidimensional ou profundidade de carbonização básica (β_0) e a nominal (β_n) que considera o efeito da transferência de calor próximo às quinas da seção. O (β_0) é obtido por meio da observação sob condição de exposição ao fogo padronizada onde somente uma das faces é exposta e (β_n) é obtido por meio de observação sob condição de fogo padronizada onde ocorre o arredondamento das arestas.

O item 3.3.2 da Eurocode 5 utiliza as seguintes equações para cálculo da profundidade de carbonização da madeira (Figura 13):

$$d_{\text{char}, 0} = \beta_0 \cdot t \quad (1)$$

$$d_{\text{char}, n} = \beta_n \cdot t \quad (2)$$

Onde:

$d_{\text{char}, 0}$ é a profundidade de carbonização em apenas uma face;

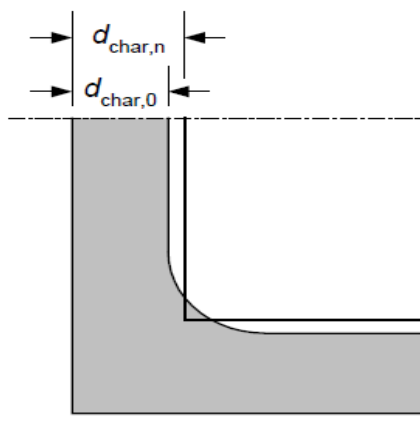
$d_{\text{char}, n}$ é a profundidade de carbonização onde ocorre o arredondamento das arestas;

β_0 é a profundidade de carbonização básica (mm/min.);

β_n é profundidade de carbonização nominal (mm/min.);

t é tempo de exposição ao fogo (min.)

Figura 13 – Profundidade de carbonização



Fonte: (Eurocode 5, 2002).

A tabela 4 apresenta diferentes estudos com diferentes expressões matemática para cálculo da velocidade de carbonização da madeira de acordo com cada espécie analisada (PINTO, 2005).

Tabela 4 - Modelos matemáticos para a profundidade de carbonização da madeira.

| Autores | Características | Modelos |
|---------------------------------|--|---|
| Lawson, Webmester, Aston, 1950. | Madeira: Spruce Vigas com seção 38x50 mm, $u=12\%$, ASTM E 119. | $\frac{\partial x}{\partial t} = 1,041^{-0,2}$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização. |
| Vorreiter, 1956. | Madeira: Spruce Placas de seção 10 mm de espessura. | $x = 0,345 \frac{t^{1,3}}{\rho - \rho_c}$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; ρ_c densidade do carvão. |
| Schaffer, 1967. | Madeira Douglas-fir, southern pine e White oak. MLC com 75mm de espessura, $u = 6$ a 18%, exposição a ASTM E 119. | $t = [(2,27 + 0,046u)\rho + 0,33]x$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; |
| White, 1988. | Madeira Engelm spruce; Western red cedar; Southern pine; Redwood; Hard maple; Yellow poplar; Red oak e Brasswood, MLC com 63 mm de espessura, $u = 6$ a 16%, exposição a ASTM E 119. | $\ln(\eta) = -1,7418 + 0,8485f_{car} + 0,9388u + 0,002t$ t é o tempo; x localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; u teor de umidade; f_{car} fator de contração do carvão. |

Fonte: (PINTO, 2005).

Segundo Pinto (2005), com relação a carbonização da madeira têm-se usado basicamente dois procedimentos para conduzir os ensaios :a)exposição ao fluxo constante de calor e b) curvas de temperatura-tempo padronizadas.

3.1.1.8 Processos de tratamento da madeira

Segundo Calil Juniors (1997), a idéia equivocada de que a madeira tem vida útil curta, negligenciou-a como material de construção. Embora seja susceptível ao ataque de organismos deterioradores sob condições específicas, quando preparada com tecnologia e tratamento preservativo eficiente, torna-se um material muito durável, tendo em vista que se pode obter proteção efetiva por períodos de até 50 anos ou mais.

No entanto Wilkinson (1979) comenta que a preservação da madeira visa o uso adequado e racional da floresta, com redução da demanda, mas a aplicação de um preservativo só é economicamente viável se a vida útil da madeira for significativamente aumentada em relação àquela usada sem tratamento. O preservativo de madeira precisaria ter características únicas de eficiência e segurança e apresentar o menor risco possível para o aplicador, para aquele que manipula a madeira tratada e para quem a utiliza. As suas características ideais seriam: mínima toxicidade aos seres vivos, proteção da madeira contra os organismos xilófagos, retenção do produto na madeira ao longo dos anos e custo reduzido. Além disso, não deveria ser inflamável e alterar as características da madeira e dos materiais em contato com ela. Até o presente momento, este preservativo ideal ainda não foi encontrado. As substâncias com maior eficácia apresentam toxicidade e os produtos relativamente atóxicos são ineficientes como preservativos

Lepage (1986) comenta que um produto químico para ser utilizado como preservativo de madeira tem de satisfazer uma série de requisitos:

a) Eficiência: É o requisito básico de todo o preservativo. Deve apresentar-se tóxico à gama mais ampla possível de organismos xilófagos. A medida da eficiência é feita, preliminarmente, por meio de ensaios de laboratório e depois por ensaios de campo. Deve ainda, para ser eficiente, permitir penetração profunda e uniforme na madeira. Esta característica está correlacionada com o método de tratamento empregado.

b) Segurança: Deve apresentar toxidez baixa em relação a seres humanos e animais domésticos, além de não aumentar as características de combustibilidade inerentes à madeira. Complementando, a solução

preservativa não deve ser corrosiva a metais e plásticos com que são confeccionados recipientes e equipamentos, uma vez que em caso afirmativo podem ocorrer vazamentos que podem, por seu turno, dar origem à poluição.

c) Permanência ou resistência à lixiviação: depende das propriedades físicas e químicas do preservativo e a maneira pela qual se fixa na madeira: para ser resistente à lixiviação deve ser insolúvel em água ou formar complexos insolúveis por meio de reação química com os componentes da parede celular da madeira.

d) Custo: é sem dúvida o fator que viabiliza o uso de um produto que apresente todas as potencialidades anteriormente mencionadas. A madeira tem, em termos de custo anual, apresentar competitividade com outros materiais. Hoje em dia, os preservativos têm um peso considerável na composição de custos, que sem dúvida, deve ser uma preocupação permanente na pesquisa de novas alternativas, impostas pelas restrições de natureza ecológicas cada vez mais rigorosas.

e) Outras características: além das anteriormente mencionadas, existem outras que se poderiam denominar facultativas e que são impostas pelas peculiaridades de cada situação de uso. Por exemplo, madeira para habitação e para certos tipos de embalagens deve deixar a superfície limpa e isenta de odores residuais. Para dormentes ferroviários a condutividade elétrica é um fator relevante devido ao sistema de sinalização.

Segundo PFEIL (2011), os principais processos de preservação podem ser classificados e definidos como:

- Processo de impregnação superficial.

São processos de pinturas superficiais, ou por imersão das peças em preservantes. Este procedimento é econômico sendo recomendáveis somente em peças não expostas as intemperes. Tanto na imersão como na pintura a impregnação dificilmente será superior a 2 ou 3mm, sendo suficiente para tratamento contra inseto e pequenas trincas e fendas.

- Processo de impregnação por pressão reduzida.

Processo de impregnação por pressões naturais, conseguindo-se penetração em todo o alburno. Pode ser efetuado de duas maneiras.

a) Processo de dois banhos, um quente e outro frio. Em um recipiente é colocado o impregnante aquecido à temperatura de ebulição da água, sendo as peças introduzidas neste líquido, ali ficando por quatro horas.

Após este período as peças são retiradas e colocadas imediatamente no mesmo líquido, sendo, entretanto frio por um período de 30 minutos. A expulsão do ar aquecido força a entrada do preservativo através da pressão atmosférica sobre o vácuo relativo. É um processo bastante efetivo recomendado para topo de postes, mourões de cerca tanto na parte enterrada como na superior.

b) Processo de substituição da seiva sendo possível somente em peças verdes e, portanto, um processo lento. As peças de madeira são imersas no imunizante havendo a troca da seiva por capilaridade e osmose. Uma peça de 15 cm de diâmetro por 3 metros de comprimento demora no verão aproximadamente 60 dias para estar imunizada.

- Processo de impregnação por pressão elevada.

São os mais eficientes, normalmente indicados para peças que estarão sujeitas a diversos tipos de predadores. Existem dois processos clássicos:

a) De células cheias, sendo as peças carregadas em autoclaves, sob vácuo de 70 cm de mercúrio por duas horas. Com este processo é retirado o ar e a água do tecido lenhoso. Em seguida a madeira é exposta ao banho do preservante sob pressão de 10 atm, durante três horas, sob uma temperatura entre 90 e 100 °C. Finalmente o material é submetido ao vácuo de 30 cm de mercúrio, por 30 minutos, a fim de retirar o excesso de preservante.

b) De células vazias, sendo as peças submetidas a uma pressão inicial de 3 atm, a seco, por noventa minutos. Após este período é aplicado um banho à pressão de 10 atm, sob temperatura de 90 a 100 °C por três horas. Um novo vácuo é aplicado que retira todo preservante contido no material, pela expulsão do ar sob pressão inicialmente inserido.

3.1.1.9 Principais tipos de preservativos da madeira

Entre os preservativos oleosos ou oleossolúveis, encontram-se o creosoto, o pentaclorofenol e os hidrocarbonetos clorados. Entre os preservativos hidrossolúveis, pode-se citar arsenato de cobre cromatado (CCA), boro e ácido bórico, borato de cobre cromatado (CCB), arseniato de cobre amoniacal e cromato de cobre ácido (LEPAGE, 1986 *apud* APPEL et al 2007).

O creosoto é uma substância oleosa de cor escura obtida através da destilação de alcatrão de hulha que contém basicamente hidrocarbonetos

(90%), ácidos e bases de alcatrão; é solúvel em óleo, repelente à água, atua como anticorrosivo e possui um forte cheiro característico. É um dos mais eficientes preservativos de madeira, entretanto, deixa a madeira escurecida e oleosa e não aceita pintura (LEPAGE, 1986, *apud* APPEL et al 2007).

Pentaclorofenol é um produto solúvel em vários tipos de óleos, obtido da reação entre o fenol e o cloro pela completa substituição dos átomos de hidrogênio pelo de cloro. Confere alta e persistente proteção à madeira e por ser insolúvel em água, não sofre lixiviação. Entretanto, a ANVISA (2007), proíbe o uso deste produto no Brasil, em função das características toxicológicas e da contaminação ambiental em decorrência da emissão de dioxinas e outras substâncias tóxicas quando da queima da madeira tratada. Esse preservativo, também conhecido como Pó da China, é um dos produtos controlados no Tratado PIC Global (informação e consentimento prévio em caso de comércio ou transporte internacional). Altamente persistente no ambiente e comprovadamente carcinogênico para animais, pode afetar os sistemas cardiovascular, respiratório, gastrointestinal, neurológico, endócrino e reprodutivo, além de causar problemas dermatológicos (CDC, 2005 *apud* APPEL et al 2007).

O composto CCB tem como ingredientes ativos o óxido cuproso e o boro. Existem dúvidas em relação a sua resistência à lixiviação e sua eficiência, em longo prazo, no combate aos insetos. Os compostos de boro, apesar de terem menor toxicidade, não se fixam adequadamente na madeira (LEPAGE, 1986).

O CCA é o preservativo responsável pelo maior volume de madeira tratada e tem sido utilizado amplamente no mundo inteiro, desde a sua descoberta em 1933 pelo cientista indiano Dr. Sonti Kamesan. Protege-a contra o apodrecimento por fungos, ataque por insetos ou brocas marinhas. É indicado para tratamento de madeira em uma grande variedade de usos, incluindo dormentes, postes, mourões, construções residenciais e comerciais, estacas e outros. A Norma NBR-8456:1984 regula a sua fabricação no Brasil (AWPA, 1996 *apud* APPEL et al 2007).

O CCA é classificado em três tipos, de acordo com as diferentes formulações e as variações das porcentagens de cobre, cromo e arsênico. No Brasil, o tipo mais utilizado é o tipo C, que apresenta cromo, como CrO_3 , (47,5 %), cobre, como CuO , (18,5 %) e arsênico, como As_2O_5 (34,0 %) (AWPA, 1996 *apud* APPEL et al 2007).

O cromo provoca a precipitação de grande parte do cobre e do arsênico na madeira. Os preservativos com CCA são indicados somente para tratamento pelo processo de vácuo- pressão em autoclave (célula cheia) pelo fato de reagirem muito rapidamente com a madeira, logo após a impregnação interior da madeira, há a formação de um complexo polimérico, repelente à água o que o torna insolúvel e resistente à lixiviação (WILKINSON, 1979).

É recomendado para as mais variadas situações, como excelente protetor, por apresentar propriedades tanto fungicidas como inseticidas. Os papéis do cobre e arsênico na formulação são o de inibir o desenvolvimento de fungos e insetos, respectivamente, enquanto o cromo desempenha o seu papel no processo de "fixação" (DAWSON et al., 1991).

Entretanto, no que diz respeito ao meio ambiente e à saúde pública seu uso é polêmico, devido ao alto índice de toxicidade apresentada. Os componentes presentes neste preservante, principalmente arsênio e cromo, são elementos com alta toxicidade e, em vários países, há restrições quanto à sua utilização. Essas restrições possuem como base a perda dos componentes do CCA ao longo do tempo por lixiviação ou volatilização, acarretando riscos de contaminação ao ser humano e ao meio ambiente. Além dos problemas ambientais e ocupacionais relacionados à produção e utilização da madeira tratada com CCA, um desafio ainda maior, atualmente, é a disposição final dos resíduos gerados após a vida útil, por serem considerados perigosos (FERRARINI et al, 2012).

Existem diferentes interpretações no que diz respeito à classificação dos resíduos resultantes dos processos de tratamento da madeira. Em alguns países europeus, esses resíduos recebem a classificação de perigosos e, por este motivo, a sua disposição final segue legislação rigorosa (FERRARINI et al, 2012).

3.1.1.9.1 Metais componentes do CCA e seus efeitos

A despeito do cobre ser um importante micronutriente, ele é tóxico no seu estado iônico livre, em níveis mais elevados. Embora ele possa ser amplamente distribuído para os materiais orgânicos no ambiente aquático, é particularmente imobilizado pelo ácido húmico (solução ácida resultante da extração de componentes orgânicos do solo ou do subsoilohúmus- por soluções aquosas percolantes) (APPEL et al 2007).

A matéria orgânica apresenta um alto grau de seletividade de adsorção para com o cobre, entretanto, em concentrações baixas, o cobre será imobilizado pelo ácido húmico e somente à medida que os sítios de ligação forte vão sendo saturada, uma quantidade maior será solubilizado pelos ácidos fúlvicos ou por compostos orgânicos mais simples, fato que não ocorre com a quantidade mobilizada do CCA (APPEL et al 2007).

A exposição crônica pode causar sintomas vagos como irritação nasal, nos olhos e na orofaringe, dores epigástricas, tonturas, vômitos, diarreia. A ingestão acidental, ou intencional, de altas doses pode causar necrose tubular renal aguda, insuficiência hepática, sendo também relatado cirrose em crianças e alguns casos fatais (APPEL et al 2007).

O cromo é um metal "cinza-aço" com forma cristalina cúbica, inodoro, muito resistente à corrosão. Não ocorre de forma livre na natureza. O cromo ocorre em vários estados de oxidação que vão de Cr^{+3} a Cr^{+6} , sendo as formas mais estáveis a elementar (0), a trivalente (III) e a hexavalente (VI), em ordem crescente de toxicidade (ATSDR, 2000, *apud* APPEL et al 2007).

O cromo é liberado para a atmosfera não só por processos industriais, mas também por combustão, como queima de florestas ou incineração de lixo doméstico e industrial. O produto destas emissões está principalmente na forma hexavalente que se mantém estável enquanto suspensa no ar. No entanto, ao se depositar no solo, pode entrar em contato com matéria orgânica e reduzir-se a cromo trivalente (APPEL et al 2007).

O cromo também pode chegar aos recursos hídricos através dos efluentes líquidos, em decorrência dos processos industriais. A maior parte do cromo liberado na água se deposita nos sedimentos. Uma pequena porcentagem permanece na água nas formas solúvel e insolúvel, podendo ser transportado para o oceano. Como esses compostos não são voláteis, o seu transporte da água para o ar não ocorre, exceto por meio de neblinas de águas marinhas (APPEL et al 2007)..

O destino do cromo no solo é dependente da especiação do metal. Os processos de transformação que essas espécies sofrem na atmosfera, na água e no solo dependem do pH, do potencial redox, das condições aeróbicas e anaeróbicas e da matéria orgânica formadora de complexos. Assim sendo, pode-se concluir que há predominância de cromo (III), forma que apresenta baixa solubilidade e reatividade resultando em baixa mobilidade no ambiente e baixa toxicidade para os organismos

vivos. No entanto, sob condições oxidantes, o cromo (VI) pode estar presente, sendo uma forma relativamente solúvel, móvel e tóxica para organismos vivos (SILVA et al., 2003).

Em vários lugares, surgem críticas e novas questões sobre o corrente critério de disposição dos resíduos contendo metais pesados no solo, que não apresentam uniformidade, variando de país a país (*European Commission of Environment*, 2002). Parece que apesar da suposta estabilidade termodinâmica do Cr (III), a presença de certos minerais de ocorrência natural, os óxidos de manganês, poderiam promover a oxidação do Cr (III) para Cr (VI) nos solos. Este fato é de preocupação pública, visto que, o Cr (VI) é biodisponível em condições de pH alto e que, neste estado de valência, é altamente móvel, tornar-se-ia um risco real a possibilidade de contaminação (APPEL et al 2007).

O arsênico é um elemento químico que está normalmente presente no ambiente e em sistemas biológicos. É um semimetal incolor e inodoro que pode existir em quatro estados de oxidação, arsenato (+5), arsenito (+3), arsina (-3) e o metal (0). As espécies solúveis, geralmente, ocorrem nos estados de oxidação +3 e +5. A estabilidade e a predominância das espécies de arsênico em meio aquático dependem do pH (APPEL et al 2007).

O arsênico raramente ocorre na forma livre, geralmente encontra-se ligado a enxofre, oxigênio, ferro e cloro. Compostos inorgânicos de arsênico são introduzidos na natureza principalmente por atividades humanas como mineração, indústria de vidros e química, preservação de madeiras e fundição de metais, sendo que a maior parte se encontra na forma trivalente. O arsênico pode ainda ser metilado por microrganismos no solo e nas águas doces e do mar, formando compostos orgânicos (APPEL et al 2007).

A ordem decrescente de toxicidade dos compostos de arsênico é a seguinte: arsina > arsenito > arseniato > ácidos alquil-arsênicos > compostos de arsênio > arsênico elementar. O arsênico trivalente (arsenito) é 60 vezes mais tóxico do que a forma oxidada pentavalente (arseniato). Os compostos inorgânicos são 100 vezes mais tóxicos do que as formas parcialmente metiladas (MMA e DMA), não se excluindo a toxicidade destes, conforme já referido anteriormente pelos trabalhos japoneses (APPEL et al 2007).

As primeiras manifestações são do trato gastrointestinal. Podem ocorrer danos na mucosa devido à irritação primária com ulcerações, sangramentos, náuseas, vômitos, dor abdominal intensa e diarreia. Podem surgir efeitos cardiovasculares, com depleção de volume

intravascular, devido à alteração da permeabilidade dos vasos e pela perda gastrointestinal de líquidos, além de choque hipovolêmico. Pode exercer ação direta no músculo cardíaco, originando quadros de miocardite; no sistema nervoso central, são relatados quadros de encefalopatia; no fígado, ocorrência de hepatite tóxica e, no rim, insuficiência renal (APPEL et al 2007).

Em relação à toxicidade da mistura CCA, poucos estudos e relatos estão disponíveis. Essas formulações estão classificadas como corrosivas (baseadas no seu pH menor que dois) e como sensibilizantes para a pele. A exposição ao CCA, embora seja uma combinação de cromo, cobre e arsênico, pode apresentar efeitos diversos dos causados pelos componentes isoladamente, devido às mudanças na toxicidade e na toxicocinética (HSE, 2001 *apud*, APPEL et al 2007).

3.1.1.9.2 Posição atual em diferentes países

A comissão européia banuiu a comercialização da madeira tratada com CCA, para a grande maioria dos usos residenciais, a partir de 30 de junho de 2004. Entretanto, nenhum dos países da comunidade européia proibiu ou retirou a madeira tratada que ainda se encontra em uso. As madeiras tratadas, que estiverem em uso, devem ser rotuladas com selo, a partir de janeiro de 2003. O seu emprego foi banido na Suíça, Indonésia e Vietnã. Restrições ao uso do CCA já existem em países como Alemanha, Bélgica, Luxemburgo, França, Portugal, Espanha, Itália, Grécia, Áustria, Reino Unido, Irlanda, Finlândia, Suécia, Dinamarca, Holanda, Japão. No Reino Unido, o uso é permitido com controles e pesquisas ambientais e ocupacionais. O Canadá está no mesmo processo de transição do uso que os Estados Unidos. Na Austrália e na Nova Zelândia, estão sendo revisados o registro e a rotulação com selo de advertência dos produtos que contêm arsênico. Um estudo de revisão foi disponibilizado para consulta pública em 2004 (*Public consultation on the use of arsenic in the preservation of wood*, 2004). No Brasil, não há registro de restrição e/ ou proibição. No entanto, os resíduos originados no processo de preservação da madeira são classificados como perigosos por suas propriedades tóxicas. A presença de compostos com arsênico e cromo conferem ainda ao resíduo, características de periculosidade de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 10004, 2004) (APPEL et al 2007).

3.1.2 Aço

Largamente usado na construção civil, o aço pode estar presente como parte das obras ou como material principal. O sistema construtivo em aço permite liberdade no projeto de arquitetura, maior área útil, flexibilidade, compatibilidade com outros materiais, menor prazo de execução, racionalização de materiais e mão-de-obra, alívio de carga nas fundações, garantia de qualidade, maior organização nos canteiros de obras e precisão construtiva. A maior resistência do aço conduz à melhoria das condições para vencer grandes vãos, com menores dimensões das peças e menores pesos (DIAS, 2001).

3.1.2.1 Definições

Segundo a composição química, os aços utilizados em estruturas construtivas são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga. Os dois podem receber tratamentos térmicos que modificam suas propriedades mecânicas (PFEIL, 2008).

- **Aços-carbono**

Os aços-carbono são os tipos mais usados, nos quais o aumento de resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono e, em menor escala, pelo manganês. Eles contêm as seguintes porcentagens máximas de elementos adicionais.

Carbono 2,0%, silício 0,60%, manganês 1,65% e cobre 0,35%, sendo que em função do teor de carbono, distinguem-se três categorias, o aço de baixo carbono com teor menor que 0,29%, o de médio carbono com teor de 0,30% a 0,59% e o de alto carbono com teor entre 0,60% e 2,0%.

Os principais tipos de aço-carbono usados para perfis estruturais são indicados na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço.

| Especificação | Teor de carbono % | f_y (Mpa) | f_u (Mpa) |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| ABNT MR250 | Baixo | 250 | 400 |
| ASTM A7 | | 240 | 370-500 |
| ASTM A36 | 0,25-0,29 | 250 | 400-500 |
| ASTM A307 | Baixo | - | 415 |
| ASTM A325 | Médio | 635 | 825 |
| EM S235 | Baixo | 235 | 360 |

Fonte: (PFEIL, 2008).

- **Aços de baixa liga**

Os aços quando acrescidos de elementos de liga, tais como, cromo, nióbio, cobre, molibdênio, níquel, fósforos, vanádio e zircônio, de forma a melhorar suas propriedades mecânicas, são chamados de aços de baixa liga.

Na tabela 6, são apresentadas as propriedades químicas dos aços de baixa liga comumente utilizado para fins estruturais, conforme recomenda a NBR 7007:2002, onde MR significa média resistência, AR significa alta resistência e COR significa maior resistência à corrosão atmosférica.

Tabela 6- Propriedades químicas.

| Grau | C % | Mn ²⁾ % | Si % | P % | S % | Cu % | V % | Nb % | Cr % | Ni % | Mo % |
|---|--------------|-----------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------|
| MR 250 | 0,23 máx. | - ³⁾ | 0,05 a 0,40 | 0,040 máx. | 0,050 máx. | 0,35 máx. | - ³⁾ | - ³⁾ | 0,35 máx. | 0,35 máx. | 0,05 máx. |
| AR 350 ¹⁾ | 0,23 máx. | 0,50 a 1,35 | 0,10 a 0,40 | 0,040 máx. | 0,050 máx. | 0,35 máx. | 0,050 máx. | 0,050 máx. | 0,35 máx. | 0,35 máx. | 0,05 máx. |
| AR 350 COR ¹⁾ | 0,20 máx. | 0,50 a 1,35 | 0,15 a 0,55 | 0,040 máx. | 0,050 máx. | 0,25 a 0,50 | 0,050 máx. | 0,050 máx. | 0,40 a 0,70 | 0,50 máx. | 0,10 máx. |
| AR 415 ¹⁾ | 0,26 máx. | 0,50 a 1,35 | 0,10 a 0,40 | 0,040 máx. | 0,050 máx. | 0,35 máx. | 0,050 máx. | 0,050 máx. | 0,35 máx. | 0,35 máx. | 0,05 máx. |
| ¹⁾ Nb + V ≥ 0,010 %. ²⁾ Para cada redução de 0,01% no teor máximo de carbono especificado, um aumento de 0,06% no teor de manganês acima do especificado será permitido até o limite máximo de 1,50%. ³⁾ Não especificado. | | | | | | | | | | | |

Fonte: (NBR 7007:2002).

As propriedades físicas e mecânicas para cálculo em estruturas construtivas devem ser adotadas os seguintes valores, na faixa normal de temperaturas atmosféricas segundo a NBR 8800:2008:

$E = 200.000$ Mpa, módulo de elasticidade do aço (todos os aços);

$G = 77.200$ Mpa, módulo de elasticidade transversal do aço (todos os aços);

$\gamma = 0,3$ coeficientes de Poisson;

$\beta a = 1,2 \times 10^{-5}$ por °C, coeficiente de dilatação térmica;

$\rho a = 7850$ Kg/m³, massa específica.

3.1.2.2 Materiais utilizados na proteção térmica das estruturas de aço

A solução mais frequentemente empregada para evitar o aumento excessivo da temperatura das estruturas de aço em situação de incêndio é revesti-las por meio de materiais de proteção não combustíveis. Esses materiais possuem características muito diversas, e podem ser aplicados de diferentes modos (SILVA, Pignatta et al , 2008).

Materiais rígidos ou semi-rígidos são aplicadas a seco, tanto na forma de “caixas” quanto de “envolventes”. Esse grupo de materiais inclui as fibras cerâmicas, a lã de rocha basáltica, o silicato de cálcio, gesso (placas de gesso acartonado ou o próprio gesso) e vermiculita. Todos são materiais incombustíveis. A maior parte é somente aplicável a interiores. Os tempos de resistência ao fogo desses produtos podem atingir até 240 minutos. As placas de gesso acartonado e vermiculita são duras e lisas, possuindo aparência agradável mas por outro lado, são vulneráveis ao impacto. As mantas de fibras minerais (fibra cerâmica e lã de rocha basáltica) são macias ao toque e flexíveis. Os problemas potenciais associados às fibras “soltas” são minimizados, em países desenvolvidos, pela utilização de um recobrimento composto de uma fina folha de alumínio. A aparência visual variará de acordo com o sistema escolhido (SILVA, Pignatta et al , 2008).

3.2 MEDIDAS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO

A principal finalidade da “segurança contra incêndio em edificações” é minimizar o risco à vida das pessoas expostas ao sinistro. Uma vida humana é perdida a cada dez minutos devido a incêndios, segundo estatísticas internacionais (Silva, Valdir Pignatta et al , 2008).

Neste sentido, pode-se considerar que as preocupações de segurança contra incêndio em uma edificação se referem a três objetivos fundamentais, que são por ordem decrescente de importância:

1. A proteção das vidas dos ocupantes do edifício, bem como dos bombeiros que nele tenham de atuar em caso de sinistro;
2. A proteção dos bens existentes no edifício e das atividades que se desenvolvem no mesmo;
3. A proteção do próprio edifício contra danos de incêndios que possam se deflagrar nele ou em edifícios vizinhos.

Um sistema de segurança contra incêndio é composto de um conjunto de meios ativos (sistemas de detecção e alarme de incêndio, de extintores, de hidrantes e mangotinhos, de chuveiros automáticos, etc.) e passivos de proteção (rotas de fuga, compartimentação, resistência ao fogo das estruturas, etc.). O nível esperado de segurança contra incêndio

pode ser obtido pela integração dos sistemas de proteção ativa e passiva no projeto da edificação (Silva, Valdir Pignatta et al , 2008).

O aço, o concreto, a madeira, assim como outros materiais estruturais, têm sua capacidade portante reduzida quando submetido a altas temperaturas. Não levar em consideração esse efeito estará incorrendo em erros desastrosos e impagáveis. Estudos sobre o comportamento de estruturas em incêndio também tiveram seu início no final do século XIX e início do século XX, após a constatação que os novos materiais e sistemas construtivos que estimularam a verticalização das cidades, com o uso do aço e do concreto armado, também eram susceptíveis ao calor das chamas (Silva, Valdir Pignatta et al , 2008).

Hoje, se reconhece que a capacidade resistente do concreto (EC2, 2004), do aço (EC3, 2003), das estruturas mistas (EC4, 2003), da madeira (EC5, 2004), da alvenaria estrutural (EC6, 2005) e do alumínio (EC9, 1998) em situação de incêndio é reduzida em vista da degeneração das propriedades mecânicas dos materiais ou da redução da área resistente. Apesar da redução das propriedades mecânicas do concreto e da madeira ser mais acentuada, em função da temperatura, do que a do aço deve-se lembrar de que a temperatura média atingida por um elemento isolado de aço em incêndio é geralmente maior do que a dos outros dois materiais. (SILVA, Valdir Pignatta et al , 2008)

3.3 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO

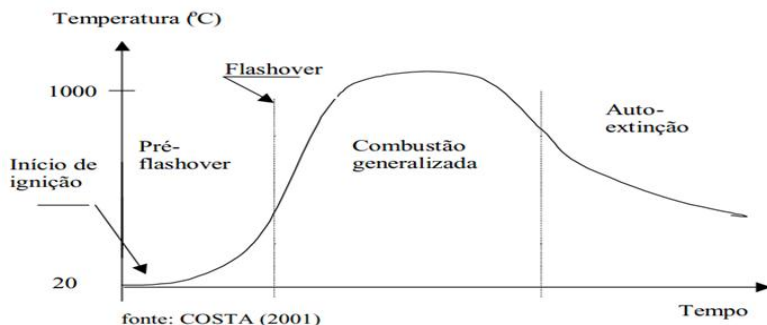
Segundo a NBR 14432:2001, a resistência ao fogo é a propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável.

Segundo DIAS (2006), no estudo das estruturas sujeitas ao fogo, o principal instrumento de análise é a curva que fornece a temperatura dos gases em relação ao tempo de incêndio, uma vez que a partir desta curva é possível calcular-se a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais e sua correspondente resistência a altas temperaturas. Estes diagramas são chamados de curvas de incêndios real (figura 14).

As Normas EC3: 2003 e EC5: 2004 permitem o emprego de curvas de incêndio natural ou real. Segundo SCHLEICH J. B., SCHERER, M. (1991), o emprego de curvas de incêndio natural nas análises que visam ao projeto de segurança contra incêndio é, evidentemente, mais adequado dado a grande diferença entre o incêndio

padrão e os incêndios reais. Assim é que são pesquisadas curvas naturais em laboratórios, ainda que para compartimentos reduzidos.

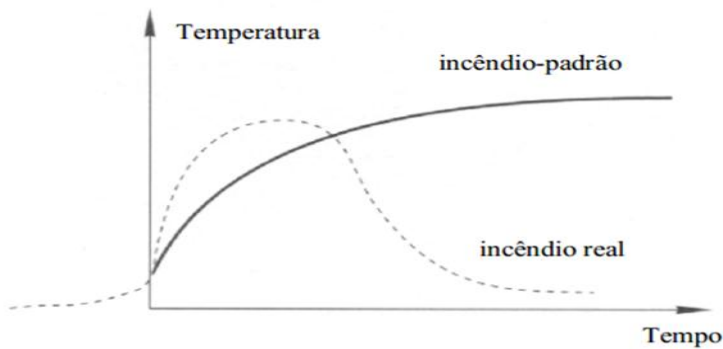
Figura 14- Curvas de incêndio real.



A curva temperatura versus tempo apresentada na Figura 14 é a representação da elevação de temperatura em um incêndio real. A primeira fase – inicial (*pré- flashover*) com baixas temperaturas, onde o incêndio não atingiu grandes proporções, ainda não trazendo risco à estrutura, mas sim, à vida humana devido à liberação de gases tóxicos e fumaça. Nessa fase, cabe à proteção ativa, representada pelos chuveiros automáticos, extintores, mangueiras, etc. efetuar a extinção do incêndio. Com o aumento da temperatura a curva tem uma inclinação acentuada (*Flashover* ou incêndio generalizado), onde toda carga combustível está em estado de combustão. Neste momento o incêndio eleva-se provocando temperaturas elevadas e danos significativos a estrutura e após um determinado tempo inicia-se a queda gradativa da temperatura.

Segundo DIAS (2006), tendo em vista que, para cada situação, a curva temperatura-tempo (real) do incêndio se altera, convencionou-se adotar uma curva padronizada para servir de modelo na análise experimental de estruturas ou de materiais isolantes térmicos em fornos de institutos de pesquisa (Figuras 15).

Figura 15- Curva de incêndio padrão.



Fonte: (DIAS, 1997).

A partir da curva temperatura-tempo dos gases quentes é possível determinar-se, a temperatura máxima atingida na fase de combustão generalizada durante o incêndio. A NBR 14432:2001 em seu item 3.27 define como Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF): Tempo mínimo de resistência ao fogo, preconizado por esta Norma, de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão.

A NBR 14432:2001 em seu anexo A, determina ainda que, os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) devem ser determinados conforme a tabela A.1 (Tabela 7).

Tabela 7- Tempo mínimo de resistência ao fogo

| OCUPAÇÃO/ USO | ALTURA DA EDIFICAÇÃO | | | | |
|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | $h \leq 6m$ | $6m \leq h \leq 12m$ | $12m \leq h \leq 23m$ | $23m \leq h \leq 30m$ | $h > 30m$ |
| Residência | 30 | 30 | 60 | 90 | 120 |
| Hotel | 30 | 60 | 60 | 90 | 120 |
| Supermercado | 60 | 60 | 60 | 90 | 120 |
| Escritório | 30 | 60 | 60 | 90 | 120 |
| Shopping | 60 | 60 | 60 | 90 | 120 |
| Escola | 30 | 30 | 60 | 90 | 120 |
| Hospital | 30 | 60 | 60 | 90 | 120 |
| Igreja | 60 | 60 | 60 | 90 | 120 |

Fonte: (NBR 14432:2001).

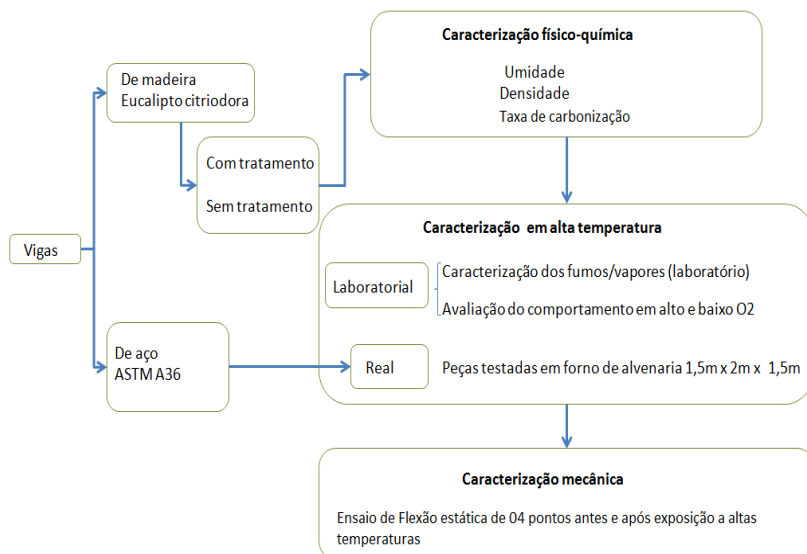
Para o caso em estudo será considerado o tempo de exposição da temperatura máxima de 60 (sessenta) minutos de acordo com o item “g” do Anexo A da NBR 14432:2001.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de avaliar o comportamento da madeira e aço, foram desenvolvidos experimentos que simulassem o comportamento em condições de incêndio. Para tanto, foram utilizadas vigas confeccionadas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e, como elemento de comparação, vigas de aço estrutural A36.

Os experimentos foram estruturados em duas condições distintas: uma relativa à caracterização físico-química da madeira *Eucalyptus citriodora* com e sem tratamento e, a segunda, simulando condições reais de incêndio em temperaturas diferentes, em estruturas de grande porte e condições controladas. Nesta última etapa foram realizados ensaios de rompimento á flexão estática para avaliar as mudanças nas propriedades mecânicas. A rota desenvolvida neste trabalho é apresentada no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma dos experimentos desenvolvidos para avaliar os materiais testados.



Os procedimentos experimentais contidos nesse trabalho foram realizados no I-Parque (Parque Científico e Tecnológico) que pertence à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

Os ensaios foram executados de acordo com as normas NBR 5628:1980, NBR 14432:2001, NBR 8800: 2008, NBR 14323:2001, NBR 7190:2001 e a norma internacional EC5: 2004 , EN 1995-1-2 (determina a espessura da camada de carbono).

A seguir serão apresentados os materiais e métodos empregados no desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 Madeira e aço

A madeira utilizada foi a espécie do tipo *Eucalyptus* Citriodora, em função de sua disponibilidade, vasta aplicação na construção civil e suas propriedades físico-mecânicas (Tabela 8).

Tabela 8 - Espécies de madeira utilizadas nos ensaios.

| Nome comum | Nome científico | ρ_{ap} (12%) (kg/m ³) | fco,m (MPa) | Classe de resistência |
|----------------------|------------------------------|---|-------------|-----------------------|
| Eucalipto Citriodora | <i>Eucalyptus citriodora</i> | 999 | 62,0 | C60 |

Fonte: (Anexo E da NBR 7190:1997).

As peças foram fornecidas na forma de vigas quadradas com dimensões de 12 cm x12cm de seção transversal e comprimento de 200 cm (Tabela 9), tratadas através do processo de impregnação por pressão elevada com preservativos do tipo CCA (Anexo C). Para cada condição de ensaio foram preparadas três amostras e os resultados indicados representam a média aritmética entre elas.

A quantidade de amostras utilizadas e definidas para o ensaio em forno teve como finalidade representar 95% de confiança e, a indicação é proveniente de madeira com classificação visual de acordo com anexo G da norma NBR 7190:1997.

As dimensões das peças de madeira foram determinadas de forma a cumprir o item 10.2.1 da NBR 7190:1997, que considera que peças principais isoladas, como vigas e barras longitudinais de treliças, a área mínima das seções transversais deverá ser igual a 50 cm² e a espessura mínima de 5 cm. A priori isto garantiria que mesmo após uma

profundidade de carbonização teórica de aproximadamente 2 a 3 cm gerada em condições de incêndio, as dimensões continuariam dentro do que prescreve a Norma.

Os perfis de aço foram do tipo aço carbono 1020 do tipo I 150x13, 5 kg/m laminados e comprimento de 200cm . Estes perfis foram colocados no forno de acordo com as temperaturas determinadas na tabela 09, sendo que 3 perfis foram mantidos em temperatura ambiente, o restante dos perfis foram adicionados ao forno a partir de 350 °C.

Tabela 9 - Amostras de madeira e aço utilizadas nos ensaios.

| Material | 32°C | 200°C | 350°C | 650°C | 700°C |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|
| Madeira | 6A | 1A | 1C | 4A | 5A |
| | 6B | 2A | 2C | 4B | 5B |
| | 6C | 3A | 3C | 4C | 5C |
| Aço | 6A | - | 1C | 4A | 5A |
| | 6B | - | 2C | 4B | 5B |
| | 6C | - | 3C | 4C | 5C |

4.1.1.1 Massa específica aparente

A determinação da massa específica convencional foi determinada de acordo com o procedimento descrito na norma NBR 7190:1997, definida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado.

A massa seca foi determinada mantendo-se os corpos de prova em estufa a 103°C até que a massa do corpo de prova permaneça constante. O volume saturado foi determinado em corpos-de-prova submersos em água até atingirem massa constante.

4.1.1.2 Umidade

Para determinação do teor de umidade das peças submetidas aos ensaios mecânicos foi seguido o que especifica a NBR 7190 da ABNT (1997), determinando a massa inicial dos corpos de prova, e posteriormente mantida em estufa, com temperatura de 103°C ± 2°C até atingirem massa constante, considerada como massa seca. Os valores obtidos das resistências foram corrigidos para umidade padrão de referência de 12%, de acordo com a NBR 7190:1997.

A resistência foi corrigida pela expressão:

$$f_{12} = f_{u\%} \cdot \left(1 + \frac{3(u\% - 12)}{100} \right) \quad (3)$$

Onde:

f_{12} = Resistência corrigida para 12% de umidade;

$f_{u\%}$ = Resistência na umidade real;

$u\%$ = Umidade real.

E a rigidez por:

$$E_{12} = E_{u\%} \cdot \left(1 + \frac{2(u\% - 12)}{100} \right) \quad (4)$$

Onde:

E_{12} = Rigidez corrigida para 12% de umidade;

$E_{u\%}$ = Rigidez na umidade real;

$u\%$ = Umidade real.

4.1.1.3 Profundidade de carbonização

Para definir a profundidade de carbonização da madeira *Eucalyptus citriodora* e assim permitir a definição da seção transversal das vigas que seriam utilizadas no ensaio em forno, foi preparada uma amostra (não tratada) com 20x20cm de seção transversal e 50 cm de comprimento e exposta a uma temperatura de superfície igual a 1000 °C por 40 minutos. Na Figura 17 é apresentado um diagrama esquemático da montagem e na Figura 18 a execução do teste.

Para a aquisição da temperatura foram utilizados 04 termopares do tipo K acoplados em um Sistema de aquisição de dados Novus e monitorados pelo software FieldChart Novus v.1.0, instalado em um microcomputador.

Figura 17 – Diagrama esquemático do ensaio para determinar a profundidade de carbonização da madeira.

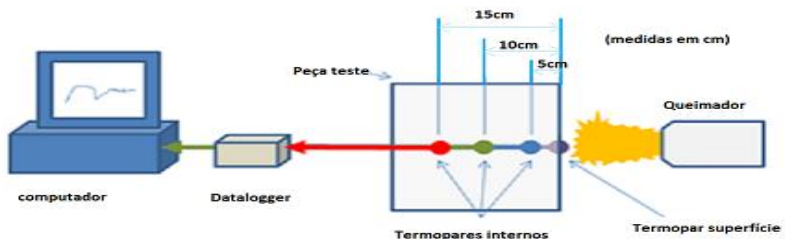
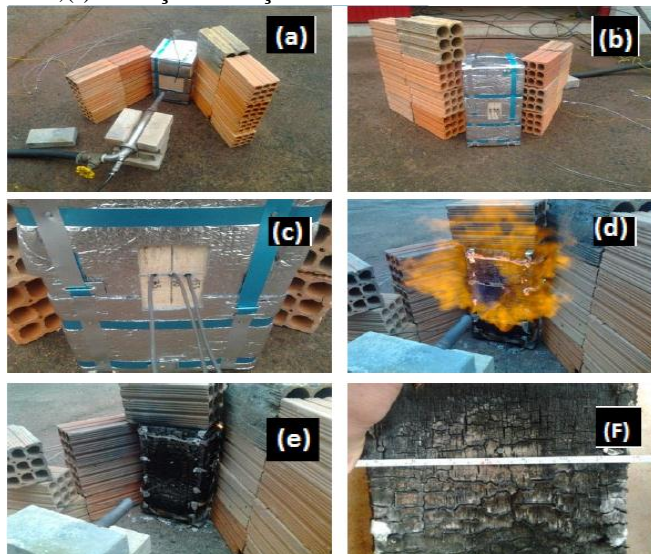


Figura 18 - (a) Posicionamento do maçarico (lado frontal), (b) lado contrário à aplicação da chama do maçarico, (c) Termopares a 5 cm, 10 cm e 15 cm da face frontal, (d) Chama do maçarico, (e) Superfície carbonizada, (f) Redução da seção carbonizada.



Após o experimento a peça de madeira de *Eucalyptus citriodora* foi resfriada com banho de água fria e levada a uma madeireira, através de uma serra fita foi retirada uma amostra da seção transversal com 5 cm de espessura e determinada a seção carbonizada.

4.1.1.4 Análise de concentração de metais pesados em fumos

Este ensaio teve como objetivo mensurar os componentes presentes nos preservante, devido a sua alta toxicidade com base na perda dos componentes do CCA durante um incêndio por volatilização, acarretando riscos de contaminação ao ser humano e ao meio ambiente.

Para a realização deste teste foram utilizadas quatro amostras com dimensão de 5x10x30cm, sendo duas tratadas com preservativo CCA e duas sem preservativos (Tabela 10).

Para controle do teor de oxigênio na combustão no experimento foram realizados dois procedimentos: com excesso de O₂, obtido pela máxima abertura de ar da válvula e da câmara e, um com baixo O₂, obtido pela restrição de ar para alimentação da chama, através do fechamento completo da câmara e restrição da entrada do fluxo de ar para o seu interior. Não houve mensuração das quantidades de O₂ disponíveis, apenas um controle visual da coloração da chama produzida no bico. O gás utilizado nos testes foi o GLP (Figura 19 e 20).

Figura 19 – Câmara de vedação para acúmulo de gás de combustão.

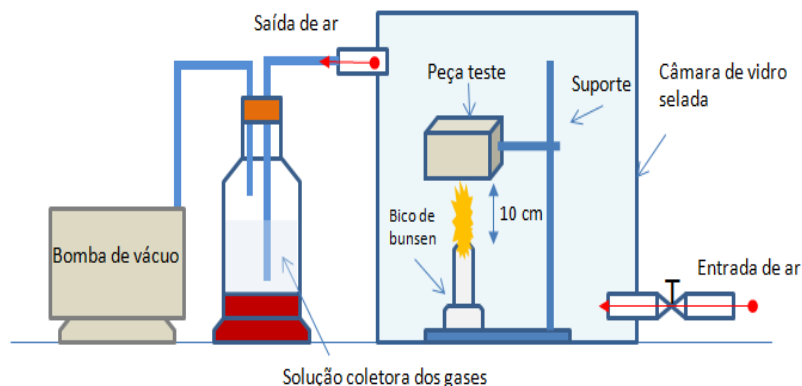


Figura 20 – (a) Alto teor de O₂ e (b) Baixo teor de O₂.

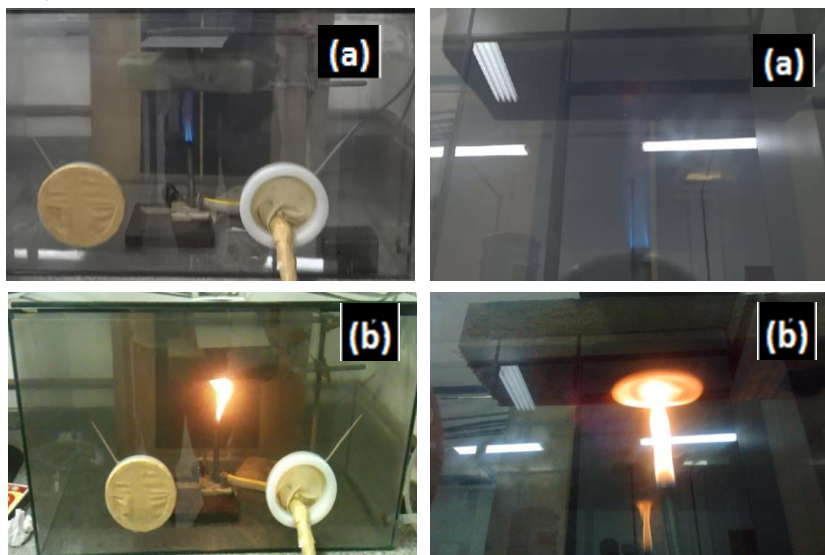


Tabela 10 - Amostras de madeira utilizadas no ensaio de emissão de gases.

| Amostras | Tratamento | O ₂ | Tempo (min) |
|----------|------------|----------------|-------------|
| T1 | CCA | Alto | 10 |
| O2 | - | Baixo | 10 |
| T3 | CCA | Baixo | 10 |
| O3 | - | Alto | 10 |

Fonte: Dados do pesquisador.

Os gases de combustão foram coletados por sucção em uma mistura de 8 ml de HNO₃ e 3 ml de H₂O₂. Em seguida acondicionada em frascos devidamente identificados e levado ao Laboratório de Águas e Efluentes Industriais (LAEI) pertencente ao I-PARQUE/UNESC, para execução de ensaio de Absorção Atômica em forno de grafite por chama.

4.1.2 Preparação para ensaio das amostras em forno

As amostras foram dispostas em um forno construído com tijolos refratários, com as dimensões internas de 150 x 200 cm e 150 cm de

altura (Figura 21). Neste forno foram colocadas três vigas de aço e três vigas de madeira de acordo com a tabela 9, por um tempo igual a 60 minutos de acordo com o determinado pela NBR 14432:2001 (Tabela 7).

Figura 21 – (a)Forno construído em tijolo refratário e (b) Disposição das vigas no forno.



O sistema de aquecimento foi constituído inicialmente por um queimador a gás natural, de baixa pressão e exaustão por dutos para temperatura de 200 °C e para o restante das temperaturas foram utilizados três queimadores, distribuídos em cada lateral do forno (Figura 22).

Figura 22 – Posição dos queimadores em faces opostas.

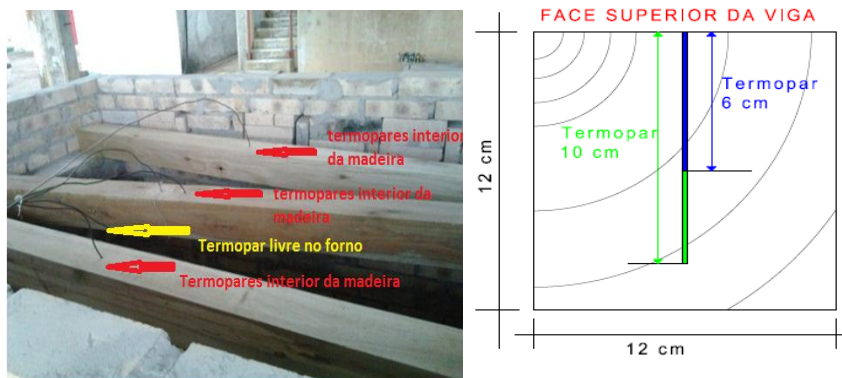


As vigas foram dispostas no forno de forma intercalada entre vigas de aço e de madeira (Figura 21). Em cada viga de madeira foi colocado um Termopar no meio do vão com 6 cm e 10 cm de profundidade ,medida esta a partir da face superior da viga (Figura 23).

No interior do forno foi instalado um Termopar, posicionado próximo às vigas de forma a obter a temperatura interna do forno.

Para as leituras das temperaturas foram utilizados 04 termopares do tipo K acoplados em um Sistema de aquisição de dados Novus e monitorados pelo software FieldChart Novus v.1.0, instalado em um microcomputador.

Figura 23 – (a) Termopares no meio do vão das vigas de madeira e (b) Termopares a 6 cm e 10 cm da face superior da viga de madeira.

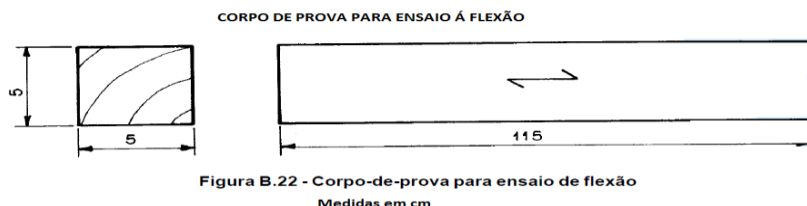


4.1.3 Ensaio de resistência à flexão estática

As vigas foram rompidas através do ensaio de resistência à flexão estática. As amostras eram compostas de 3 corpos de prova distribuídos em 5 grupos, sendo cada grupo com temperaturas determinadas no item 4.1.1.

A NBR 7190:1997 em seu Anexo B, Item 14.3, determina o tamanho mínimo da amostra para ensaio à flexão de acordo com a Figura 24.

Figura 24 – Corpo de prova para ensaio à flexão.

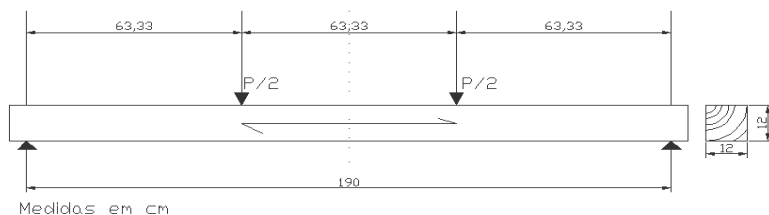


Fonte: NBR 7190:1997.

Como as amostras utilizadas estão acima das medidas estabelecidas pela norma e nesse caso sendo mais característicos para os resultados obtidos, foram utilizados os métodos de ensaios estabelecidos nesta norma.

O ensaio de resistência à flexão estática foi do tipo quatro pontos de acordo com a figura 25.

Figura 25 – Corpo de prova de flexão estática.



4.1.3.1 Equipamentos utilizados para o ensaio de flexão em 4 pontos

A instrumentação utilizada no ensaio teve como objetivo medir a carga máxima suportada pelas vigas.

Os equipamentos de registros eletrônicos foram conectados em um equipamento de aquisição de dados e armazenados ao computador.

As células de carga (Figura 26) foram utilizadas como transdutores de força.

Figura 26 – Células de carga.



Uma célula de carga com capacidade de leitura de 500 KN foi posicionada entre o macaco hidráulico e a viga de distribuição (Figura 27).

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o QuantumX MX840A de 8 canais, com interface ao programa computacional CatmanEasy -ambos da empresa HBM .

Figura 27 – Pórtico de reação.



O pórtico utilizado no ensaio está instalado no Laboratório Experimental de Estruturas (LEE), localizado no I-Parque -IDT-UNESC.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento dos diversos materiais é afetado, além de outros fatores, pela temperatura. A madeira desenvolve normalmente uma camada carbonácea que pode contribuir na redução da cinética de degradação térmica. Já os metais, de modo geral, quando expostos em temperaturas elevadas, apresentam redução dos seus limites de resistência e aumento da sua ductilidade o que, em aplicações estruturais, pode levar ao rápido colapso das estruturas construtivas.

Em virtude da grande utilização da madeira como elemento construtivo, e em particular do *Eucalyptus citriodora* tratada, há a necessidade da avaliação do comportamento deste material em condições de alta temperatura, já que há a possibilidade da ocorrência de incêndios nos locais onde estes são utilizados.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de carbonização, metais pesados presentes nos gases de combustão, alterações da madeira causadas pelo aquecimento e a influência da temperatura na capacidade de resistência das amostras.

5.1 PROFUNDIDADE DE CARBONIZAÇÃO

O ensaio proposto no item 4.1.1.3 do capítulo 4, teve como objetivo proporcionar um comparativo de redução na seção transversal das amostras de madeira antes da aquisição das amostras definitivas a serem testadas no forno.

A amostra de madeira foi serrada na parte central (Figura 28), onde se observa a profundidade da carbonização ocorrida na madeira foi comparada com o modelo de cálculo fornecido pela EC5: 2004 (Equação 01 e 02).

Figura 28 - Profundidade da carbonização na madeira.



A média de profundidade de carbonização foi de 2,53cm (25,30 mm), comparando com o modelo adotado pela EUROCODE 5 (equação 1),tem-se :

$$d_{char, 0} = \beta_0 \cdot t$$

Segundo a EUROCODE 5,para madeira folhosas adota-se $\beta_0 = 0,5$ mm/min e considerando o tempo de exposição ao fogo (t) de 40min;

$$d_{char, 0} = 0,5 \cdot 40 = 20,00 \text{ mm}$$

Considerando o efeito do arredondamento das arestas (equação 2), chega-se a:

$$d_{char, n} = \beta_n \cdot t$$

$$d_{char, n} = 0,55 \cdot 40 = 22,00 \text{ mm}$$

Valores estes próximos ao determinado no ensaio, cumprindo com o objetivo proposto, ou seja, obter uma seção com dimensões que mesmo com temperaturas altas, mantivessem o que determina o Item 10.2.1 da NBR 7190:1997 (Seção mínima de 50 cm² e as faces maiores ou iguais a 5 cm).

5.2 ENSAIOS DAS AMOSTRAS NO FORNO

Após todos os equipamentos instalados foram efetuados quatro ensaios com as amostras em temperatura de acordo com a tabela 9.

Nas figuras 29 e 30 são apresentados os perfis de temperatura desenvolvidos no ensaio em forno.

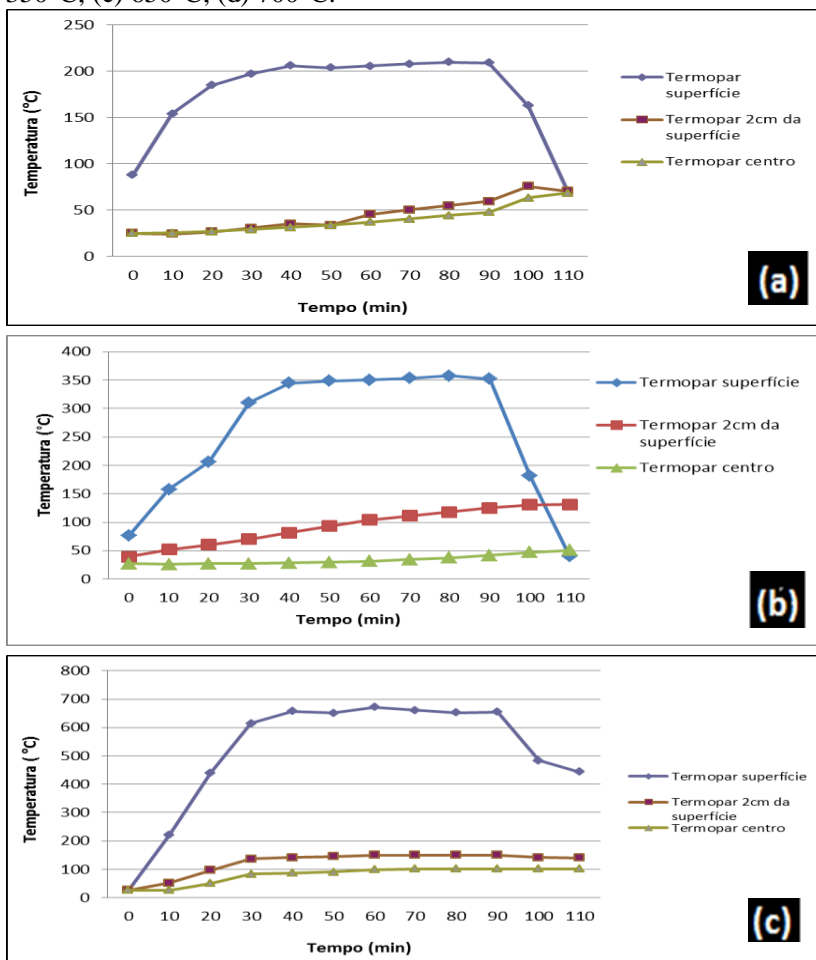
Observa-se que com a elevação de temperatura superficial, ocorreu também um aumento de temperatura interna da madeira, porém em uma taxa muito menor. Outro fator importante é que, mesmo em temperaturas elevadas, como por exemplo, em 700°C (Figura 30), as fibras experimentaram valores máximos de temperatura em torno de 180°C.

Neste sentido e, conforme apontado por Manriquez (2012), não se atingiu temperatura que pudesse causar uma degradação nos principais componentes da madeira (Celulose, Hemicelulose e Lignina) de forma efetiva nas temperaturas de 200°C, 350°C, 650°C e 700°C, onde as

máximas temperaturas a 2 cm da superfície foram iguais à 76°C , 131°C , 158°C e 181°C , respectivamente.

Na região central, em todos os casos a temperatura manteve-se no intervalo de 50°C a 100°C, após 60 minutos de testes. Isto evidencia a baixa condutividade térmica da madeira de *Eucalyptus citriodora* de acordo com determinado por Pinto (2005).

Figura 29 – (a)Gráfico temperatura x tempo para ensaio à 200°C; (b) 350°C; (c) 650°C; (d) 700°C.



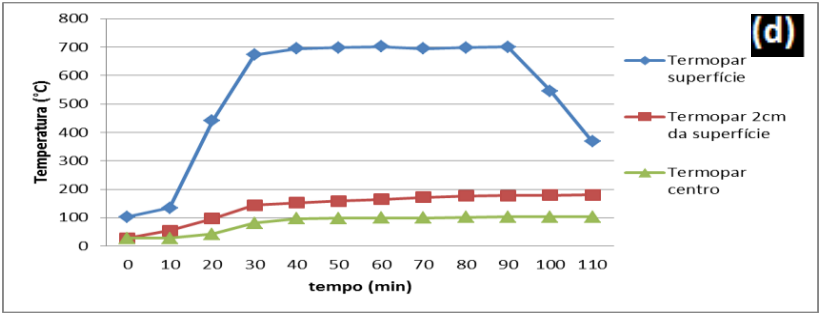
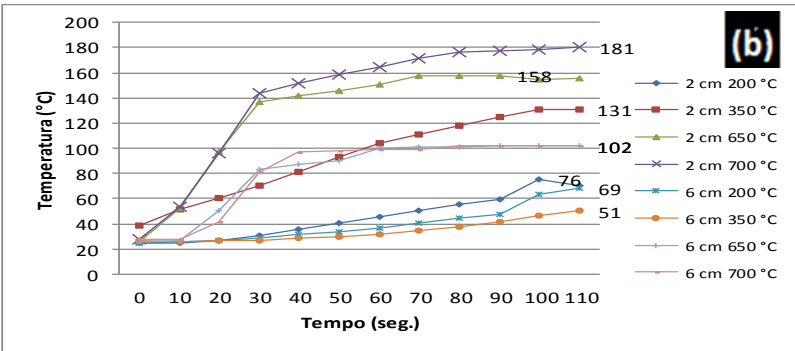
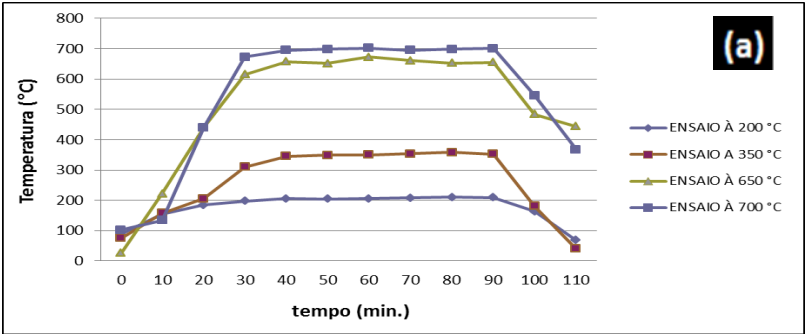


Figura - 30 – a) Gráfico resumo da temperatura x tempo para todas as temperaturas e b) Resultados comparativos entre os termopares localizados a 2 cm e 6 cm da superfície da amostra cada temperatura testada.



A seguir serão apresentados os resultados para cada conjunto de amostras, levando em conta os fatores como retratilidade e profundidade

de carbonização obtida no ensaio e comparada com o determinado pela EC5: 2004.

5.2.1 Amostras à temperatura de 200°C

Na Figura 31 podem ser observadas as vigas de eucalipto citriodora após a exposição em temperatura igual a 200°C. As vigas de aço A36 não foram expostas a esta temperatura, pois não apresentam mudanças de comportamento mecânico significativo nestas condições (Sinha, 2010).

Figura 31 – Vigas de madeira após 60 minutos à temperatura de 200°C.



Pode-se constatar que nesta temperatura as vigas de madeira não sofreram alteração quanto à profundidade de carbonização, o que era previsto pelo Eurocódigo 5, Parte 1-2, (2002) adotando como a temperatura maior ou igual a 300 °C como aquela de carbonização da madeira.

Também se verificou que não houve redução na seção das vigas e no seu comprimento (Tabela 11).

Tabela 11 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 200°C.

| Amostras | Antes ensaio | Depois do ensaio | | | | |
|----------|--------------|------------------|------|--------|--------|-----|
| | Área | TC | TCE | AC | AR | PAR |
| 1A | 144,00 | 0,00 | 0,00 | 144,00 | 144,00 | 100 |
| 1B | 144,00 | 0,00 | 0,00 | 144,00 | 144,00 | 100 |
| 1C | 144,00 | 0,00 | 0,00 | 144,00 | 144,00 | 100 |

TC=Profundidade de carbonização (mm);

TCE=Profundidade de carbonização segundo a EUROCODE 5 (mm);

AC=Área da seção total (com TC) (cm²);

AR= Área resultante (descontando TC) (cm²);

PAR=Percentual de área resultante.

5.2.2 Amostras à temperatura de 350°C

Para esta temperatura verificou-se que as vigas de madeira apresentaram profundidade de carbonização bem abaixo do determinado pela EC 5, acentuada redução da seção e um início de fissuramento da superfície, decorrente da saída de água contribuindo para a troca térmica do meio aquecido com as fibras mais internas (Figura 32), mantendo-se o comprimento constante e área interior sem degradação para temperatura de 51°C (Tabela 12). Enquanto as vigas de aço, após resfriamento não apresentaram deformações, apenas pequenos pontos de oxidação (Figura 33).

Figura 32 – Seção transversal da viga de madeira a 350°C (corte no meio do vão). (Área determinada pelo software Autocad da Autodesk).



Figura 33 – Amostras após o ensaio à temperatura de 350°C, (a) Vigas de madeira, (b) Vigas de aço e (c) Vigas de madeira com rachaduras aparentes.





Tabela 12 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 350°C.

| Amostras | Antes ensaio | Depois do ensaio | | | | | |
|----------|--------------|------------------|------|-----------|------------|------------|-----------|
| | Área | TC | TCE | Área TC | AC | AR | PAR |
| 1C | 144,0 | 7,10 | 33,0 | 14,66 | 124,46 | 109,80 | 76,25 |
| 2C | 144,0 | 5,15 | 33,0 | 11,66 | 135,11 | 123,45 | 85,73 |
| 3C | 144,0 | 5,21 | 33,0 | 12,89 | 135,52 | 122,63 | 85,16 |
| Media | 144,0 | 5,82±1,3 | 33,0 | 13,07±1,7 | 131,70±7,1 | 118,62±8,7 | 82,38±6,0 |

TC=Profundidade de carbonização (mm);

TCE=Profundidade de carbonização segundo a EUROCODE 5 (mm);

Área TC = Área de profundidade de carbonização (cm²);

AC=Área da seção total (com TC) (cm²);

AR= Área resultante (descontando TC) (cm²);

PAR=Percentual de área resultante.

5.2.3 Amostras à temperatura de 650°C

A madeira para esta temperatura ficou visivelmente degradada com aumento significativo da profundidade de carbonização, redução de seção e aparecimento de diversas rachaduras (Figura 34) (Tabela 13). Enquanto as vigas metálicas após resfriamento não apresentou deformação, mas com surgimento de pontos de oxidação (Figura 35).

Figura 34 – Seção transversal da viga de madeira à 650°C (corte no meio do vão). (Área determinada pelo software Autocad da Autodesk).



Figura 35 – Amostras após o ensaio à temperatura de 650°C, (a) Vigas de madeira e de aço e (b) Vigas de madeira com rachaduras aparentes.

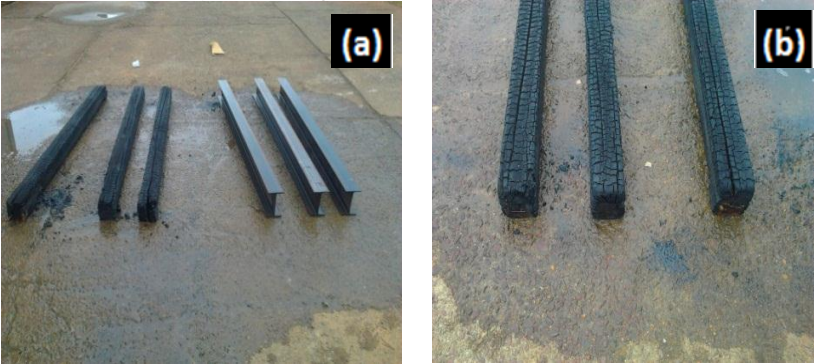


Tabela 13 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 650°C.

| Amostras | Antes ensaio | Depois do ensaio | | | | | |
|----------|--------------|------------------|------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | Área | TC | TCE | Área TC | AC | AR | PAR |
| 4A | 144,0 | 11,30 | 33,0 | 28,92 | 112,27 | 83,35 | 57,88 |
| 4B | 144,0 | 12,02 | 33,0 | 30,45 | 118,26 | 87,81 | 60,98 |
| 4C | 144,0 | 11,76 | 33,0 | 29,96 | 116,42 | 86,46 | 60,00 |
| Média | 144,0 | 11,69±0,4 | 33,0 | 29,78±0,9 | 115,65±3,5 | 85,87±2,6 | 59,62±1,8 |

TC=Profundidade de carbonização (mm);

TCE=Profundidade de carbonização segundo a EUROCODE 5 (mm);

Área TC = Área de profundidade de carbonização (cm^2);

AC=Área da seção total (com TC) (cm^2);

AR= Área resultante (descontando TC) (cm^2);

PAR=Percentual de área resultante.

5.2.4 Amostras à temperatura de 700°C

As vigas de aço continuavam mantendo seu aspecto normal, sem deformações visíveis após o resfriamento, ocorrendo apenas pontos de oxidação (Figura 37) e as vigas de madeira aumentando gradativamente a deterioração de sua seção, aumento da profundidade de carbonização e surgimento de rachaduras (Figura 36) (Tabela 14).

Figura 36 – Seção transversal da viga de madeira à 700°C (corte no meio do vão). (Área determinada pelo software Autocad da Autodesk).

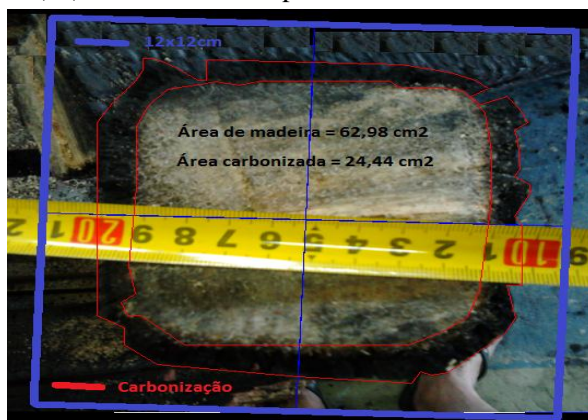


Figura 37 – Amostras após o ensaio à temperatura de 700°C, (a) Vigas de madeira e de aço e (b) Vigas de madeira com rachaduras aparentes.



Tabela 14 - Resultado das amostras após ensaio à temperatura 700°C.

| Amostras | Antes ensaio | Depois do ensaio | | | | | |
|----------|--------------|------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Área | TC | TCE | Área TC | AC | AR | PAR |
| 5A | 144,00 | 11,10 | 33,0 | 24,44 | 87,42 | 62,98 | 43,74 |
| 5B | 144,00 | 10,80 | 33,0 | 23,68 | 84,67 | 60,99 | 42,35 |
| 5C | 144,00 | 10,23 | 33,0 | 22,72 | 81,34 | 58,62 | 40,71 |
| Média | 144,00 | 10,71±0,5 | 33,0 | 23,61±1,0 | 84,48±3,4 | 60,86±2,5 | 42,27±1,7 |

TC=Profundidade de carbonização (mm);
TCE=Profundidade de carbonização segundo a EUROCODE 5 (mm);
Área TC = Área de profundidade de carbonização (cm²);
AC=Área da seção total (com TC) (cm²);
AR= Área resultante (descontando TC) (cm²);
PAR=Percentual de área resultante.

5.2.5 Área resultante da seção e área total reduzida da viga de madeira

Todos os resultados cumpriram com o Item 10.2.1 da NBR 7190:1997, que considera a seção transversal mínima de 50 cm² para vigas.

A figura 38 apresenta um gráfico com a área resultante e a figura 39 um gráfico com a área total reduzida da seção (tomando como base a área transversal antes do ensaio menos a área resultante) para cada temperatura adotada, sendo um fator fundamental na determinação final de sua resistência e posteriormente será comparado com os ensaios de rompimento das vigas para cada temperatura.

Figura 38 – Área resultante das vigas de madeira.

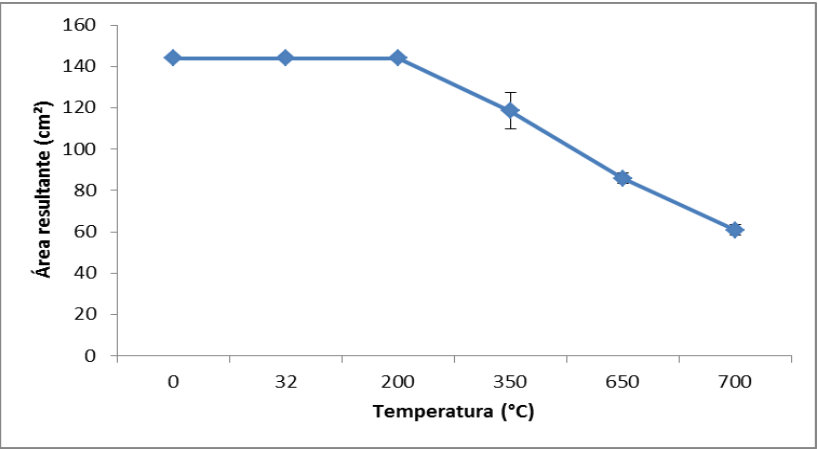
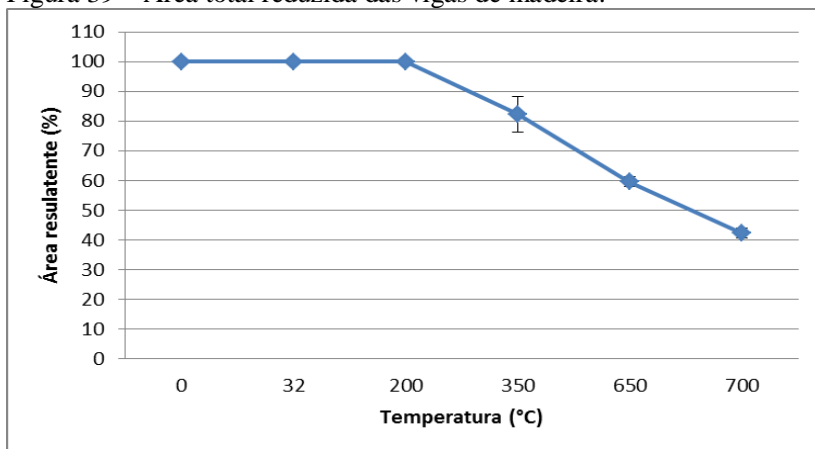


Figura 39 – Área total reduzida das vigas de madeira.



5.3 ROMPIMENTOS DAS VIGAS

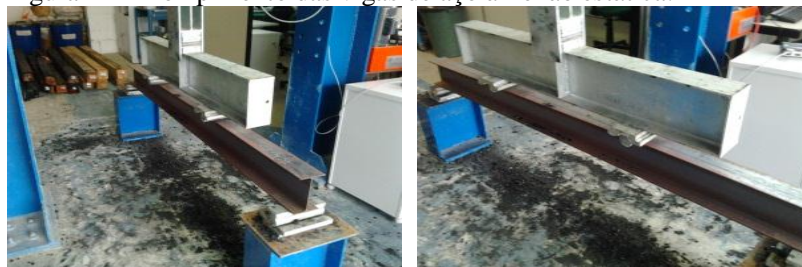
Os rompimentos das vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* ocorreram de acordo com a sequência especificada na tabela 9 (Figura 40).

Figura 40 – Rompimento das vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* à flexão estática,



As vigas de aço foram rompidas após as vigas de madeira, seguindo a sequência de temperatura à 350°C, 650°C e 700°C (Figura 41).

Figura 41 – Rompimento das vigas de aço à flexão estática.



Todas as vigas de aço sofreram rompimento por flambagem local, dessa forma reduzindo sua capacidade de resistência, o que poderia ser evitado utilizando contenção lateral. No entanto, como as vigas de madeira não possuíam contenção lateral, foi mantido o mesmo procedimento para as vigas de aço. Após resfriadas as vigas de aço não apresentaram mudança significativa nos testes de rompimento.

No entanto se os testes fossem executados a quente, as alterações das propriedades das vigas de aço, seriam verificadas de modo mais significativo. Uma vez que o peso próprio as quais foram submetidos corresponde a uma carga muito abaixo de sua capacidade de suporte ou que provocassem qualquer tipo de deformação. Os ciclos térmicos que o mesmos sofreram equivalem a um tratamento térmico, por exemplo, de alívio de tensões.

O fato maior é que a idéia era verificar se haveria deformação visível nesta estrutura nas temperaturas utilizadas. Contudo não houve possibilidade de verificação para a carga de peso próprio de suporte para a viga.

Os gráficos referentes aos ensaios efetuados com as vigas de madeira até seu ponto de ruptura estão no Anexo B.

Os resultados obtidos no ensaio de flexão estática das amostras com as cargas de ruptura estão representadas na tabela 15.

A tabela 16 apresenta a taxa de redução da capacidade de resistência às cargas em função das temperaturas as quais foram expostas e representadas no gráfico da figura 42.

Enquanto a figura 43 apresenta a redução da capacidade de resistência das vigas de madeira em função da redução da seção transversal, sendo este um fator preponderante na redução da capacidade de carga das vigas. No entanto, mesmo com temperaturas altas (700°C), as amostras mantiveram resistências mecânicas, em menor intensidade, mas não eliminando por completo sua capacidade de resistência.

Diferenciando-se de algumas bibliografias citadas por Manriquez (2012), pois foi utilizada amostra em tamanho real, comprovando a dificuldade de propagação na deterioração térmica da seção de acordo com aumento de suas dimensões.

Tabela 15 - Carga máxima suportada pelas vigas em função da temperatura.

| Vigas madeira | Carga máxima (kgf) | Carga máxima Vigas de aço (kgf) | Temperatura (°C) |
|---------------|--------------------|---------------------------------|------------------|
| 6A | 1948,7 | 4879,0 | 32 |
| 6B | 1923,0 | 4907,4 | |
| 6C | 2143,00 | 4868,4 | |
| Média | 2004,9±136,1 | 4884,9±22,8 | |
| 1A | 1966,8 | - | 200 |
| 2A | 1651,7 | - | |
| 3B | 2333,7 | - | |
| Média | 1984,0±386,5 | - | |
| 1C | 1076,7 | 4704,5 | 350 |
| 2C | 908,5 | 4785,2 | |
| 3C | 1316,5 | 4733,8 | |
| Média | 1100,5±232,0 | 4741,1±46,2 | |
| 4A | 629,7 | 3668,3 | 650 |
| 4B | 648,9 | 3728,9 | |
| 4C | 591,7 | 3698,8 | |
| Média | 623,4±32,9 | 3698,7±34,3 | |
| 5A | 538,7 | 4538,3 | 700 |
| 5B | 603,5 | 4598,4 | |
| 5C | 491,8 | 4523,2 | |
| Média | 544,6±63,4 | 4553,3±45,0 | |

Tabela 16 - Taxa de redução da capacidade de resistência das vigas em função da temperatura.

| VIGAS DE MADEIRA | | | |
|---|--------------------|--------------------|-----------------|
| REDUÇÃO DA CARGA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA | | | |
| Temperatura (°C) | Carga máxima (kgf) | Carga padrão (kgf) | Resistência (%) |
| 32 | 2004,9±136,1 | 2004,89±136,1 | 100% |
| 200 | 1984,0±386,5 | 2004,89±136,1 | 98,96% |
| 350 | 1100,5±232,0 | 2004,89±136,1 | 54,89% |
| 650 | 623,4±32,9 | 2004,89±136,1 | 31,09% |
| 700 | 544,6±63,4 | 2004,89±136,1 | 27,17% |

Figura 42 – Redução da capacidade de suporte de carga em função da temperatura.

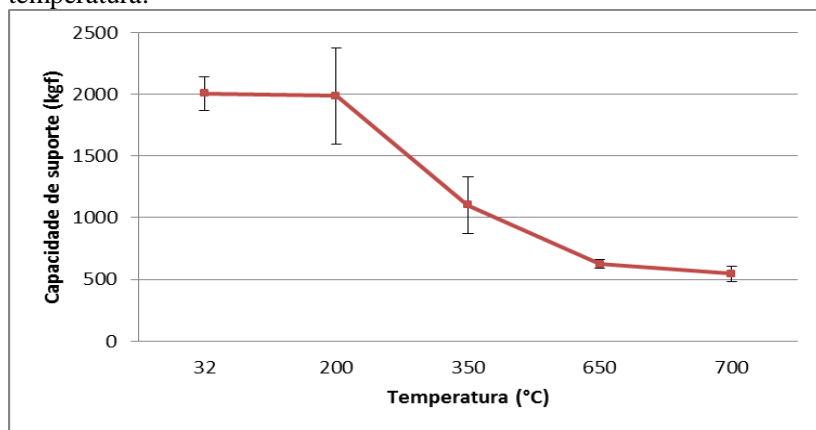
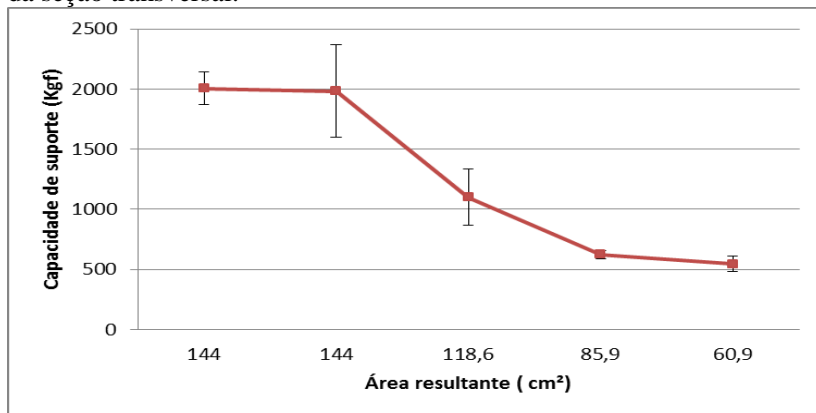


Figura 43 – Redução da capacidade de resistência das vigas em função da seção transversal.



Utilizando os critérios de cálculo à flexão estática de vigas segundo a NBR 7190:1997 e considerando as resistências características, ou seja, sem o uso de coeficientes de segurança, somente o coeficiente que ajusta os valores de resistência característica da madeira (K_{mod}), foi efetuado o cálculo da carga máxima suportada por uma viga com seção de 12x12 cm e comprimento efetivo de 190 cm, sendo estas cargas aplicadas de acordo com a figura 25 do capítulo 4 (Tabela 17).

$$P_{max} = \frac{f_{wco} \cdot h^3}{L} \quad (3)$$

Onde:

f_{wco} é a Resistência de compressão paralela às fibras;

h é a altura resultante da madeira;

L é o comprimento efetivo da viga

$$P_{max} = (121,13 \cdot 12^3) / 190 = 1101,65 \text{ kgf}$$

Através do cálculo da carga máxima suportada pela viga, verificou-se que praticamente até a temperatura de 350°C, a viga suportaria o carregamento solicitado (Figuras 44 e 45).

Tabela 17 - Cálculo da carga máxima suportada para uma viga com seção de 12x12cm e 190 cm de comprimento efetivo.

| VIGAS DE MADEIRA | | | | | | | | |
|--|---------------|------------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------------|--|
| REDUÇÃO DA CARGA EM FUNÇÃO DA ÁREA | | | | | | | | |
| Temperatura | Área (cm²) | Carga máxima suportada (kgf) | "b" e "h" | Comprimento efetivo (cm) | fwt0 | fwc0 | Carga máxima de cálculo (kgf) | Resistência à carga (A-B) (kgf) |
| (°C) | | A | (cm) | | (kgf/cm²) | (kgf/cm²) | B | (kgf) |
| 32 | 144 | 2004,9 | 12,00 | 190,00 | 60,76 | 121,13 | 1101,65 | Suporta |
| 200 | 144 | 1984,00 | 12,00 | 190,00 | 60,76 | 121,13 | 1101,65 | Suporta |
| 350 | 118,62 | 1100,50 | 10,89 | 190,00 | 60,76 | 121,13 | 1101,65 | Limite |
| 650 | 85,87 | 623,40 | 9,27 | 190,00 | 60,76 | 121,13 | 1101,65 | Colapso |
| 700 | 60,86 | 544,60 | 7,80 | 190,00 | 60,76 | 121,13 | 1101,65 | Colapso |
| Pmax=Carga máxima de cálculo (Kgf) | | | | | | | | |
| fwc0 - resistência à compressão paralela às fibras | | | | | | | | |
| fwt0 - resistência à tração paralela às fibras | | | | | | | | |
| Madeira serrada | | | | | | | | |
| Classe de umidade 1 (12%) | | | | | | | | |
| Madeira dura de primeira qualidade | | | | | | | | |

Figura 44 – Redução da capacidade de suporte das amostras em função do aumento da temperatura.

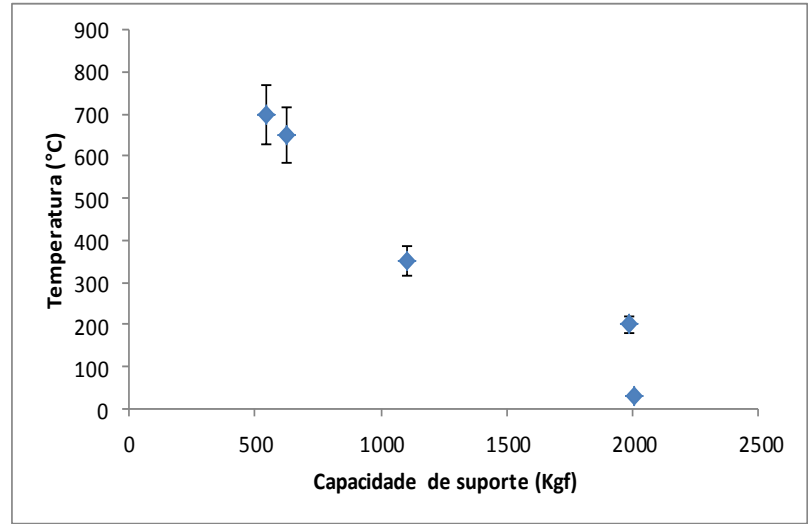
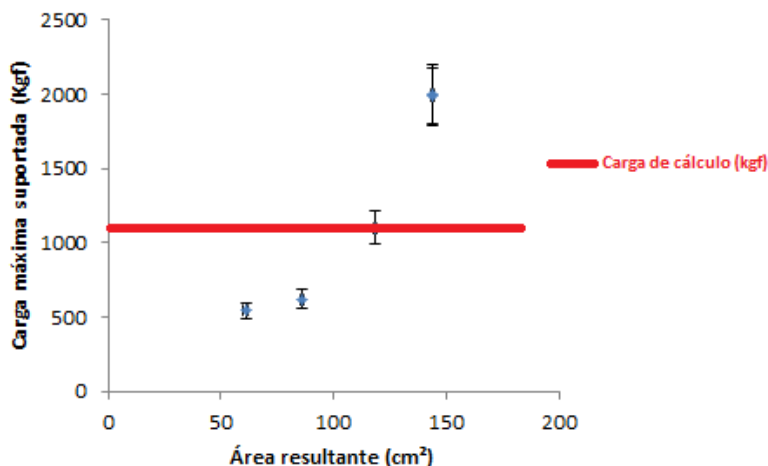


Figura 45 – Carga de ruptura experimental e a carga de cálculo dimensionada de acordo com a NBR 7190:1997.



Com os resultados obtidos nos ensaios foi possível determinar um coeficiente de majoração, de forma a compensar a redução da seção e da capacidade de suporte de carga para vigas de madeira sofrendo esforços de flexão estática. Sendo este modelo válido somente para vigas de seção quadrada, uma vez que a redução da seção pode ocorrer nos quatro lados da viga de forma constante ou variável.

Com os esforços característicos determinados para cada viga da estrutura é possível multiplicar os resultados pelo fator de majoração (K_t), corrigindo os danos causados pela degradação devido à exposição à temperatura (Figura 46).

A temperatura ou carga de incêndio pode ser determinada pelas normas do Bombeiro CBMSC – NSCI/94 – ANEXO A, onde consta o roteiro de cálculo para dimensionamento da carga de fogo de edificações.

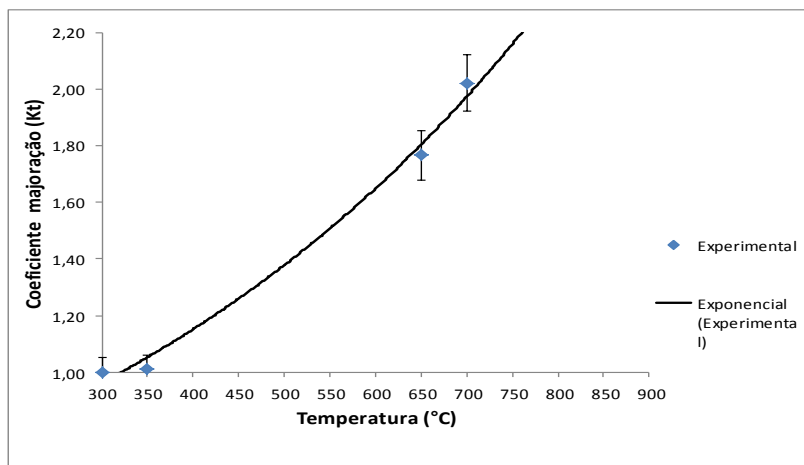
O cálculo do coeficiente de majoração serve como modelo e foi baseado nos resultados obtidos nos ensaios com peças de seção transversal quadrada e calculada da seguinte maneira:

$$K_t = (P_{\max}) / P_k \quad (4)$$

P_{\max} = Carga máxima calculada para uma viga à temperatura ambiente;

P_k =Carga de ruptura experimental das amostras para cada temperatura adotada.

Figura 46 – Coeficiente de majoração de carga características em função da temperatura pré-determinada.



Com base nos resultados calculou-se a função de ajuste para determinação do coeficiente “Kt” utilizando-se a equação 5.

$$Kt = 0,5609 \cdot e^{0,0018 \cdot t} \quad (5)$$

Onde: t = Temperatura em °C.

5.4 ANÁLISES DE CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS EM FUMOS

As amostras coletadas foram levadas ao Laboratório de Águas e Efluentes Industriais (LAEI) pertencentes ao I-Parque/UNESC, para execução de ensaio de Absorção Atômica em forno de grafite por chama (ANEXO D).

Poucos estudos são verificados onde se enfoca a toxicidade dos preservativos do tipo CCA por volatilização e muitas por lixiviação, o que dificultou em muito a obtenção de dados que servissem de parâmetros aos resultados. No entanto a *American Conference of*

Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 2000), preocupada com os aspectos da toxicidade a saúde das pessoas expostas à volatilização, prevê limites para concentração dos preservativos do tipo CCA em fumos. O que foi utilizado como parâmetros para os ensaios realizados na presente pesquisa (Tabela 18).

Tabela 18 - Relatório de ensaio de absorção atômica dos gases de combustão.

| Metais (mg/L) | Amostras | | | | Taxa Limite de Volatilização (TLV) (ACGIH,2000) |
|------------------|----------|--------|--------|--------|---|
| | T1 | T3 | 02 | 03 | |
| Arsênio | 0,881 | 0,094 | 0,040 | 0,084 | < 0,00001 |
| Cobre | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,0002 |
| Cromo | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,0005 |

A madeira, em particular a tratada com CCA apresentou uma liberação maior daqueles elementos, quando comparada a madeira não tratada. Isto ocorreu para as duas condições, tanto para a chama com combustão parcial ou total. Verifica-se ainda que as concentrações, tomando-se como referência o sugerido na ACGIH (2000), estão muito acima dos valores máximos recomendados na atmosfera.

Este fator pode ser considerado preocupante, uma vez que pequenas quantidades, principalmente de arsênio, podem levar a condições agravantes de saúde.

A norma NBR 10004:2004 (Classificação de resíduos sólidos) determina os preservativos componentes do processo CCA como Classe 1-perigosos no que se refere à lixiviação e não especifica a classificação quanto à volatilização. O que deveria ser considerado, já que em condições de incêndio apresenta-se também grande liberação de fumos, principalmente com o uso em ambientes de grande concentração de pessoas, tal como o ocorrido na cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, onde o sinistro ocorrido no dia 27 de janeiro de 2013, levou a morte mais de 230 vidas por toxicidade e mais de 100 estão hospitalizadas com problemas de pneumonia química.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

A principal finalidade da “segurança contra incêndio em edificações” é minimizar o risco à vida das pessoas expostas ao sinistro.

Os testes realizados com madeira de *Eucalyptus citriodora* tratada com preservativo do tipo CCA, permitiu determinar a capacidade máxima de suporte de carga para elementos estruturais de madeira em tamanho real à temperatura variando entre 32°C e 700°C, simulando uma situação real de incêndio.

Os resultados apresentam uma condição importante, pois, foram obtidos com amostras em tamanho real, onde o efeito da anisotropia e defeitos inerentes à formação da madeira como material natural é possível de serem detectados ao contrário do uso de peças em tamanhos reduzidos.

A madeira do tipo *Eucalyptus citriodora* tem como uma das vantagens o seu rápido crescimento, contudo esse fator também pode fazer com que as fibras cresçam de forma irregular, provocando tensões internas e consequentemente empenamentos e rachaduras o que somente pode ser detectado em amostras em tamanho real.

Neste trabalho ficou definido que a seção transversal da madeira determina o fator de degradação de seus constituintes, onde a elevação de temperatura superficial provoca também aumento de temperatura interna da madeira, porém a seção resultante da madeira permaneceu com temperaturas abaixo dos limites de degradação de seus constituintes de acordo com trabalhos desenvolvidos por Roffael e Schaller (1971), Mangalan (2005), Schaffer (1973), Tjeerdsma et al (1998) apud Manriquez (2012).

Neste contexto foi definida uma expressão possível de determinar um coeficiente de majoração, de forma a compensar a redução da seção e da capacidade de suporte de carga para vigas de madeira sofrendo esforços de flexão estática para um modelo válido para vigas de seção quadrada.

Por fim Referente ao ensaio de volatilização dos preservativos do tipo CCA em madeira tratada mostrou um alto fator de toxicidade à saúde do ser humano em caso de incêndio, com TLV muito acima do permitido pela *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH, 2000). Os valores de metais pesados obtidos mostram sim, que se deve ter maior preocupação e estudos com relação

ao uso destes preservativos em caso de incêndio como também referente ao descarte dos resíduos oriundos do uso e manejo deste material.

6.2 SUGESTÕES

Recomenda-se para futuros trabalhos:

- Pesquisar a redução da seção transversal da madeira efetuando-se um comparativo entre o fator referente à retratilidade e a profundidade de carbonização;
- Investigação da camada de carbono em situação de alto e baixo O₂;
- Determinar o impacto ambiental da volatilização do preservativo tipo CCA;
- Comparar a volatilização dos metais pesados do tipo CCA e os preservativos do tipo CCB;
- Analisar quimicamente a degradação térmica da micro estrutura da madeira;
- Efetuar pesquisas de modificação das propriedades mecânicas para outras espécies de madeira;
- Investigar a capacidade de resistência da madeira em função da temperatura e massa específica.

REFERÊNCIAS

ACGIH (American Conference of Government Industrial Hygienists). Cincinnati. **TLVs and BEIs – Threshold Limit Values for Chemical Substances and Biological Exposure Indices**. Cincinnati, U.S., 2001.

AGUIAR, Mônica Regina Marques Palermo de; NOVAES, Amanda Cardoso and GUARINO, Alcides Wagner Serpa. **Remoção de metais pesados de efluentes industriais por alumino silicatos**. Química Nova [online]. 2002, vol.25, n.6b, pp. 1145-1154.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM E119-08a **Fire tests of building construction and materials**. Philadelphia, 2009.

ANDRADE, E. N. de; VECCHI, O. Os *Eucalyptus*: **Sua Cultura e Exploração**. São Paulo: Typhographia Brazil de Rothschild & Comp, 1968.

ANGYALOSSY-ALFONSO, V. **Caracterização anatômica das principais espécies de *Eucalyptus* L'Hérit. Cultivadas no Brasil**. Tese de Doutorado, 1987. 188p. Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo.

APPELA, Júlio S.L. et al .**Aspectos toxicológicos do preservativo de madeira CCA (arseniato de cobre cromatado)**. Revista Brasileira de Toxicologia, Instituto de Toxicologia Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, Porto Alegre - RS. 19, n.1, 33-47, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio”** – NBR 14323, Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica - Especificação”** – NBR 8456, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Ações e Segurança nas Estruturas”** - NBR 8681, Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios”** - NBR 8800, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações”** – NBR 14432, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral”** – NBR 7007, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **“Componentes Construtivos Estruturais – Determinação da Resistência ao Fogo”** – NBR 5628, Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: **“Projeto de estruturas de madeira”**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **“Classificação de resíduos sólidos”**, Rio de Janeiro, 2004.

ANVISA. **Nota Técnica Sobre a Reavaliação Toxicológica do Ingrediente Ativo Pentaclorofenol e Seus Sais**. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. 2007.

AWPA (American Wood - Preservers Association). Florida Center for Solid & Hazardous Waste Management. 1996. Disponível em: <http://www.awpa.com/>. Acesso em 17dezembro 2012.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Krieger Publishing. ISBN 0-89464-777-6. Nova York, 1993. 712 p.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Krieger Publishing. ISBN 0-89464-777-6. Nova York, 1993. 712 p.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A.A. **Utilização da madeira em construções rurais.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.1, n.1, p.71-77, 1997.

CDC-U.S.A (Centers for Disease Control and Prevention). **Third National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals. 2005.**

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos; ABM; 7a ed; 1996.

COMBEN, A.J. **The effect of high temperature kiln drying on the strength properties of timber.** Wood and science, v.20, n.8, p.311–313, 1955.

Dawson BSW, Parker GF, Cowan FJ, Hong SO. **Interlaboratory determination of copper, chromium, and arsenic in timber treated with wood preservative.** Analyst. 1991.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. . **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem.** 5. ed. São Paulo: Zigurate, 2006. 159 p.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Aço e Arquitetura: Estudo de Edificações no Brasil.** São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

EC1. **General Actions – Actions on structures exposed to fire.** Eurocode 2 - Part 1-2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels: 2002.

EC2. **Design of concrete structures. Structural fire Design.** Eurocode 2 - Part 1-2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels: 2004.

EC3. **Design of steel structures. Structural fire design** Eurocode 3 - Part 1.2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels: 2003.

EC4. **Design of composite steel and concrete structures. Structural fire design** Eurocode 4 - Part 1-2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels: 2003.

EC5. Design of timber structures. Structural fire design. Eurocode 5- Part 1-2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION Brussels: 2004.

EC6. Design of masonry structures. Structural fire design. Eurocode 6 - Part 1-2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels: 2005.

EC9. Design of aluminium structures. Structural fire design. Eurocode 9 - Part 1-2. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Brussels: 1998.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions.** Walter de Gruyter Publisher. New York, 1989. 613 p.

FERRARINI, Suzana f. et al. **Classificação de resíduos de madeira tratada com preservativos à base de Arsianato de cobre cromatado e de boro/flúor.** Química Nova, 35, n.9, 1767-1771,2012.

FIGUEROA, M. J; MORAES, P. D. .Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Florianópolis - SC – Brasil; (2009).

FLEMING CA TREVORS JT. **Copper toxicity and chemistry in the environment: a review.** Water, Air, and Soil Pollut.,1989, 44:143-158.

FSHIMOYAMA, V.R. **Variações da densidade básica e Características anatômicas e químicas da madeira em Eucalyptus sp.** 1990. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

HSE (The Health and Safety Executi UK). **Evaluation on:Review of copper chrome arsenic: use as an industrial wood preservative.** York: Pesticides Safety Directorate,Department for Environment, Food and Rural Affairs.2001.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- IPT (2003). **Madeira: Uso sustentável na construção civil.** São Paulo, Sinduscon-SP, Publicação IPT; 2980.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834 . **Fire-resistance tests – Elements of building construction**, 1975. 16p.

KEYLWERTH, R.; CHRISTOPH, N. **Study of thermal decomposition of wood by using differential thermal analysis**. Materialprüfung, v.2, n.8, p.281–288, 1960.

KOZLIK, C.J. **Kiln temperature effect on tensile strength of Douglas fir and Western hemlock lumber**, *Forest Product Journal*. v.26, n.10, p.30–34, 1976.

LADDELL, J.L. **High temperature kiln drying of Canadian woods. Report of exploration investigations on softwoods**, *Forest Product Laboratory*, v.11, 1953. 170 p.

LARSON, P.R.; KRETSCHMANN, D.E., CLARK III, A.; ISEBRANDS, J.G. 2001. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: A synopsis**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-129. Madison, In: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 42 p.

LATORRACA, J.V.; ALBUQUERQUE, C.E. C. **Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira**. *Revista Floresta e Ambiente*, v.7, n.1, p.279-291, 2000.

LEPAGE, E. S. (1986) - **Preservativos e sistemas preservativos. Manual de Preservação de Madeiras**, vol. I 279 - 342.

LEVAN, S.L. Thermal degradation. In: Schniewind AP (Ed.): **Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials**. Exeter, England, Pergamon Press, p.271–273, 1989.

MACLEAN, J.D. **Effect of steaming on the strength of wood**. *Proceeding of American Wood Preservers Association*, v.49, p.88–112, 1953.

MANRIQUEZ FIGUEROA, Manuel de Jesús. **Coefficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira à temperatura**. Florianópolis: Ed. UFSC, 2012. 259 p. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

MORA, A.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112 p.

NEWEEL AD, Sanders JG. **Relative copper binding capacities of dissolved organic compounds in a coastal-plain estuary**. Environ. Sci. and Tech., 1986, 20:817-821.

NORMA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO (NSCI). **”Carga de fogo (Anexo A)”**. Santa Catarina. Florianópolis: EDEME, 1994. 144p.

PETRI, V.N.; ANANYIN, P.I. **The influence of high temperature drying on the mechanical properties of timber**. **Industrial Wood Processing No.4**, Trans. From Russian D.P.No.7, 1960

PFEIL, Walter. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a NBR 7190/97 e critérios das normas americanas NDS e européia EUROCODE 5**. 5.ed Martins Fontes: LTC, 2011. 221 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço: Segundo a NBR 8800:2008**. 8 Ed Rio de Janeiro: LTC, 2008. 307 p.

PINTO, E. M.. **Determinação de um modelo pra profundidade de carbonização transversal a grã para a madeira de E. Citriodora e E. Grandis** / Edna Moura Pinto. - São Carlos, 2005.

PINTO, E.M; CALIL, C. Jr. (2002). **Ensaio para avaliação do comportamento de materiais expostos ao fogo: Resistência e Reação**. In: Revista Madeira Arquitetura e Engenharia, v.9. ISSN 1516-2850.

PORTAL DA MADEIRA. (s.d.). Obtido em 18 de dezembro de 2012, de **Aspectos técnicos e curiosidades**: <http://portaldamadeira.blogspot.com>.

RESENDE, D. J. **Análise da combustão e carbonização do Eucalyptus spp por termogravimetria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995. 96 p.

SANDERS JG, WINDOM HL. **The uptake and reduction of arsenic species by marine algae**. Estuar. and Coastal Marine Sci., 1980, 10:555-567.

SANTOS, E.S.; BALLARIN, A.W. **Correlações entre os módulos de Elasticidade à compressão paralela às fibras e à flexão para algumas espécies de eucalipto.** In: VIII; .(2002).

SCHAFFER E. L. **Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dryDouglas-fir.** *Journal of testing and evaluation* , v. 1, n. 4, p 319-329, 1973.

SCHAFFER E. L. **State of structural timber fire endurance.** *Wood and fiber* , v. 9, n. 2, p 145-170, 1977.

SHAFIZADEH, F. **Pyrolytic reactions and products of biomass.** In: Overend PP; Milne TA; Mudge LK (Eds.): **Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion.** Elsevier. New York, p.183–217, 1985.

SCHLEICH J. B. , SCHERER, M. (1991). **Compartment Temperature Curves in Function of OpeningFactor and Fire Load** . RPS Report. ARBED Recherches no 08/90. Luxemburgo.

SCHNEIDER, A. **Investigations on the convection drying of lumber at extremely high temperatures Part 2: Drying degrade, changes in sorption, colour and strength of Pine sapwood and Beech wood at drying temperatures from 110 to 180 °C.** *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.31, p.198–206, 1973.

SILVA CS, Azevedo FA, **Chasin AAM.Cromo.** In: Azevedo FA, Chasin AAM, ed. Atheneu, 2003. São Paulo, p.35-65.

SILVA, J.C. **Cresce a presença do eucalipto no Brasil.** *Revista da Madeira*, Curitiba, n.92, p.61–66, 2005.

SILVA, V. P. **Determination of the steel fire protection material thickness by analytical process - A simple derivation.** *Engineering Structures.* Reino Unido, v. 27, n. 14, p. 2036-2043, 2005.

SILVA, VALDIR PIGNATTA et al. **A Segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 496

SINHA, K **Physical Metallurgy Handbook;** McGraw Hill ed., NY; 2010.

WANGAARD,F.F. **Wood:its structure and properties,the Pennsylvania State University,USA,1979.**

WILKINSON JG. **Industrial timber preservation.** London: The Rentokil Library/Associated Business, 1979.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. **The Chemistry of Wood Strength.** In: ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.

YONG,F. et al ; **The Science and Technology of Civil Engineering Materials,**Prentice Hall,USA,1998.

ANEXOS

ANEXO A – Termo de garantia da madeira tratada com preservativo tipo CCA.



Balneário Gaivota 03 de Dezembro de 2012.

DE: BR TRATAMENTO DE MADEIRAS LTDA

CNPJ: 03.935.162/0001-00

Rodovia (SC 485) José Tiscoski

Balneário Gaivota – SC Fone /Fax: (48) 3583-1789

CLIENTE: RAMON GUSTAVO SANTOS BITENCOURTE

CPF:032280849-90

Nota Fiscal - 291

TERMO DE GARANTIA

Prezado Senhor:

Com respeito à madeira de eucalipto serrada abaixo especificada orçada por vossa senhoria nesta data, informamos que :

A madeira por nós fornecida é submetida a tratamento por processo vácuo e pressão, em nossa autoclave com aplicação do preservativo CCA-C, com garantia do tratamento pelo tempo médio mínimo de 10-(dez) anos.

| Especificação | Diâmetro | Comprimento |
|---|----------|-------------|
| Madeira de Eucalipto Serrado e Tratado | 12 x 12 | 2,00 M |

BR Tratamento de Madeiras

ANEXO B- Gráficos com as curvas de ensaio de rompimentos para as vigas de madeira, (a) Vigas 6A, 6B e 6C, (b) Vigas 1A, 2A e 3A, (c) Vigas 1C, 2C e 3C, (d) Vigas 4A, 4B e 4C, (e) Vigas 5A, 5B e 5C.

